

---

# Untersuchungen zur Vorhersage und Beschreibung der Farbwahrnehmung von Beleuchtungsspektren durch modifizierte Spektralwertfunktionen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Marvin Henry Böll  
geboren am 22.11.1977  
in Brühl (Köln)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Tag der Einreichung: 10.03.2015  
Tag der mündlichen Prüfung: 10.11.2015

D17  
Darmstadt 2016



---

## **Vorwort**

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Für das Zustandekommen und für die Betreuung dieser Arbeit bin ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh zu großem Dank verpflichtet. Herr Professor Khanh hat mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und auch schon zuvor als Student immer vorbildlich und intensiv betreut, wobei mir immer der nötige Freiraum gegeben wurde, die fachlichen Themen und die Bearbeitung der Problemstellungen selbst zu gestalten.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Edgar Dörsam für sein Interesse an der Arbeit, der Annahme des Korreferats und der damit verbundenen Investition seiner Zeit.

Die vorliegende Arbeit besteht aus einigen Probandenstudien. Ich möchte mich hiermit bei allen Versuchsteilnehmern für ihre Teilnahme und Unterstützung bedanken.

Mein Dank gilt auch allen meinen Kollegen des Fachgebietes für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen sowie den Aufbau meines Testaufbaus.

Mein besonderer Dank gilt Max Wagner und Cynthia Böll für das Lesen und Editieren meiner Arbeit.

Mein tief empfundener Dank gilt meiner Lebensgefährtin Tri Wahyuningsih, meinen Eltern, meiner Familie und den Eltern meiner Lebensgefährtin für ihre immerwährende Unterstützung.

Darmstadt, den 20.05.2016

Marvin Henry Böll



---

## **Erklärung laut §9 der Promotionsordnung**

---

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 20.05.2016

-----  
(Marvin Böll)



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation .....	2
1.1	Aktueller Forschungsstand .....	2
1.2	Problemstellungen .....	8
1.3	Ziele der Arbeit .....	11
2	Grundlagen.....	13
2.1	Das visuelle System des Menschen.....	13
2.2	Die Ishihara Farbtafeln .....	16
2.3	Farbmetrik.....	17
2.3.1	Einfluss der Feldgröße auf die Spektralwertfunktionen.....	22
2.3.2	Metamerie .....	23
2.3.3	Chromatische Adaptation .....	24
2.3.4	MacAdam Ellipsen .....	24
2.3.5	Tristimuli .....	25
2.3.6	$L^*a^*b^*$ Farbraum .....	26
2.3.7	DIN99-Farbraum .....	27
2.3.8	Berechnung des Farbabstandes $\Delta E_{99}$ .....	30
2.3.9	Alternativer Farbraum basierend auf den LMS-Zapfensignalen .....	32
2.3.10	Farbwiedergabeindex.....	32
2.4	Analyse der Ergebnisse .....	35
2.4.1	Einstichproben t-Test [52] .....	35
2.4.2	Konfidenzintervalle [52].....	36
2.4.3	Kovarianzellipsen [53] .....	37
2.5	Leuchtmittel .....	38
2.5.1	Halogenleuchtstofflampe.....	38
2.5.2	Kompaktleuchtstofflampe.....	39
2.5.3	Light Emitting Diode.....	40
2.6	Pulsweitenmodulation.....	44
2.7	Thermisches Management .....	45

2.8	Spektrometrie.....	46
3	Aufbau und Methodik zur Untersuchung des Farbabstandes .....	50
3.1	Aufbau zur Untersuchung des visuellen Abgleiches.....	50
3.1.1	Versuchsaufbau .....	50
3.1.2	Aufbau der Lichtmodule.....	54
3.2	Versuchsablaufbeschreibung.....	62
3.3	Messtechnik .....	65
4	Laborversuche – Ergebnisse – Analyse.....	66
4.1	Bewertung diverser Spektralwertfunktionen zur Berechnung der Farbabstände .....	66
4.1.1	Bewertung der Normspektralwertfunktionen anhand der Abstände (interpersonell) .....	66
4.1.2	Analyse des Farbabstandes unter Verwendung der CIE Normspektralwertfunktionen...	68
4.1.3	Analyse des Farbabstandes unter der Verwendung von individuellen Normspektralwertfunktionen.....	75
4.1.4	Farbabstand unter Verwendung von modifizierten $x_{10}(\lambda)$ , $y_{10}(\lambda)$ , $z_{10}(\lambda)$ Normspektralwertfunktionen.....	81
4.1.5	Intrapersonelle Betrachtung der Normspektralwertfunktionen anhand der individuellen Funktionen von Stiles und Burch .....	94
4.1.6	Intrapersonelle Betrachtung der Normspektralwertfunktionen anhand der modifizierten Funktionen.....	98
4.2	Bewertung von alternativen Funktionen und Methoden zur Berechnung des Farbabstandes .....	100
4.2.1	Analyse des Farbabstandes unter der Verwendung der modifizierten $l_{10}(\lambda)$ , $m_{10}(\lambda)$ , $s_{10}(\lambda)$ - Spektralwertfunktionen.....	100
4.2.2	Einfluss der chromatischen Adaptation auf den visuellen Abgleich unterschiedlicher Lichtquellen.....	102
4.3	Bewertung der inter- und intrapersonellen Streuung nach einem visuellen Abgleich unterschiedlicher Lichtspektren .....	107
4.3.1	Interpersonelle Streuung nach einem visuellen Abgleich .....	107
4.3.2	Intrapersonelle Streuung nach einem visuellen Abgleich .....	114
5	Diskussion der Ergebnisse.....	122
5.1	Beeinflussung des Abstandes.....	122
5.1.1	Bewertung konventioneller Normspektralwertfunktionen .....	122
5.1.2	Bewertung alternativer Spektralwertfunktionen.....	123



5.1.3	Verwendung einer modifizierten Normspektralwertfunktion.....	123
5.1.4	Individuelle Bewertung der Testpersonen.....	124
5.2	Alternativer Farbraum und alternative Methoden.....	125
5.2.1	Alternativer Farbraum .....	125
5.2.2	Zuweisung einer Spektralwertfunktion in Abhängigkeit vom Lichtspektrum .....	125
5.3	Bereiche erkennbarer Farbunterschiede .....	126
5.3.1	Interpersonelle Streuung.....	126
5.3.2	Intrapersonelle Streuung.....	126
5.4	Kritik und Anmerkungen .....	127
5.4.1	Bewertung der Methodik .....	127
5.4.2	Bewertung der Normspektralwertfunktionen.....	127
5.4.3	Bewertung der alternativen Berechnungsmethode.....	127
5.4.4	Inter- und Intrapersonelle Streuung .....	128
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	129
7	Literaturverzeichnis.....	132
A.	Hardware.....	137
B.	Statistik.....	142
C.	Mittelwerte und Konfidenzintervalle .....	143
D.	Prüfwerte der Nullhypothesen .....	151
E.	Zuweisung individueller Spektralwertfunktionen.....	174
F.	Gruppierungen individuell zugewiesener Spektralwertfunktionen.....	178
G.	Zuweisung der modifizierten Normspektralwertfunktionen $x_{10}(\lambda), y_{10}(\lambda), z_{10}(\lambda)$ .....	180
H.	Zuweisung der modifizierten $l_{10}(\lambda), m_{10}(\lambda), s_{10}(\lambda)$ Spektralwertfunktionen .....	186
I.	Veröffentlichungen.....	191
J.	Lebenslauf.....	192

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipielle Schritte zur Berechnung des Farbortes .....	9
Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau des menschlichen Sehsystems.....	13
Abbildung 3: Aufbau des Auges. ....	14
Abbildung 4: Spektrale Empfindlichkeitsverteilung der Zapfen und Stäbchen. ....	15
Abbildung 5: Dichteverteilung der Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut. ....	15
Abbildung 6: : Ishihara-Farbtafeln.....	16
Abbildung 7: Prinzipieller Testaufbau von Guild und Wright. ....	17
Abbildung 8: $r\lambda$ -, $g\lambda$ -, $b\lambda$ - Normspektralwertfunktionen für den 2° Normalbeobachter.. ....	18
Abbildung 9: Normspektralwertfunktionen für 2° Gesichtsfeld und für 10° Gesichtsfeld .....	19
Abbildung 10: Individuelle Kurven verschiedener Beobachter für ein 10° Gesichtsfeld. ....	20
Abbildung 11: Das Verhältnis der individuellen Empfindlichkeitsfunktionen .....	20
Abbildung 12: spektralen Zapfenempfindlichkeiten $l\lambda$ -, $m\lambda$ -, $s\lambda$ für das 2°- Gesichtsfeld.....	22
Abbildung 13: Von Stockman empfohlenen Normfarbwertfunktionen für ein 2°- Gesichtsfeld und für ein 10°- Gesichtsfeld .....	22
Abbildung 14: Maximale optische Dichte der visuellen Pigmente aufgetragen über das Sichtfeld $f_s$ . ....	23
Abbildung 15: Ellipsoide in zehnfacher Vergrößerung .....	25
Abbildung 16: Die Bereiche für 1-Step, 2-Step und 3-Step MacAdam Ellipsen. ....	25
Abbildung 17: $L^*a^*b^*$ - Farbraum in 3D Koordinaten. ....	26
Abbildung 18: Die acht ungesättigten Testfarben nach DIN6169 unter Tageslicht.....	33
Abbildung 19: Die sechs zusätzlichen Farben nach DIN6169 under Tageslicht .....	33
Abbildung 20: Sichtbares Lichtspektrum einer Halogenglühlampe .....	38
Abbildung 21: Entladungsstrecke .....	39
Abbildung 22: I/U Diagramm selbständiger Entladungen .....	39
Abbildung 23: Sichtbares Lichtspektrum einer 5200 K Leuchtstofflampe.....	40
Abbildung 24: Bänderdiagramm eines p-n-Homoüberganges eines LED .....	41
Abbildung 25: Direkter Bandübergang (links) und indirekter Bandübergang (rechts). ....	42
Abbildung 26: Klassische Anordnung einer Homostruktur. ....	42
Abbildung 27: Doppelter Heteroübergang. ....	42
Abbildung 28: Bändermodell eines doppelten Heteroüberganges nach Abbildung 27. ....	43

Abbildung 29: LED Lichtspektren für die Farbtemperatur 3000 K und 5200 K.....	43
Abbildung 30: LED Lichtspektren für rote, grüne und blaue LED von Philips-Rebel. ....	44
Abbildung 31: PWM-Signal mit einem Testgrad von 25% .....	44
Abbildung 32: Prinzip der Wärmeleitung. ....	45
Abbildung 33: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung .....	46
Abbildung 34: Beugung am Transmissionsgitter.....	47
Abbildung 35: Beugung am Blaze Reflexionsgitter .....	48
Abbildung 36: Prinzipieller Aufbau eines Spektroradiometers.....	48
Abbildung 37: Testaufbau zur Untersuchung des visuellen Abgleiches.....	50
Abbildung 38: Leuchtdichteaufnahme der Innenraums des Versuchsaufbaus. ....	51
Abbildung 39: Frontansicht des Versuchsaufbaus. ....	52
Abbildung 40: X-Box Controller für die Einstellung der Lichtfarbe .....	52
Abbildung 41: Prinzipieller Aufbau der Lichtmodule. ....	54
Abbildung 42: Unterschiedliche Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 5200 K .....	55
Abbildung 43: Unterschiedliche Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 2700 K .....	55
Abbildung 44: Prinzipieller Messaufbau zur Temperaturmessung von LEDs. ....	57
Abbildung 45: Wellenlängenverschiebung vier monochromatischer LEDs .....	58
Abbildung 46: Einfluss der Temperatur auf den Farbortverschiebung von monochromatischen LEDs.....	58
Abbildung 47: Einfluss der Temperatur auf den Farbort verschiedener warmweißen LEDs ....	59
Abbildung 48: Farborte der roten LED dargestellt im $u^*v^*$ -Diagramm.....	60
Abbildung 49: Anordnung der Lichtquellen auf dem Referenzmodul.....	61
Abbildung 50: Anordnung der Lichtquellen auf dem Testmodul. ....	61
Abbildung 51: Prinzipielle Versuchsanordnung aus der Vogelperspektive.....	62
Abbildung 52: Seitenansicht der prinzipiellen Versuchsanordnung.....	62
Abbildung 53: Der Proband schaut auf die Referenzfläche. ....	63
Abbildung 54: Proband schaut auf Testfläche.....	63
Abbildung 55: Versuchsablauf für den paarweisen Farbabgleich. ....	64
Abbildung 56: Farbabstände $\Delta E_{99}$ zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung.....	69

Abbildung 57: Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung .....	71
Abbildung 58: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGB}$ .....	73
Abbildung 59: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGBW}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ .....	74
Abbildung 60: Normspektralwertfunktionen 1964 und individuelle Spektralwertfunktionen...	75
Abbildung 61: Farbabstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen .....	76
Abbildung 62: Farbabstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K-Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen .....	78
Abbildung 63: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGB}$ .....	79
Abbildung 64: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGBW}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ .....	80
Abbildung 65: Normspektralwertfunktionen von 1964. ....	82
Abbildung 66: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{5200KRGBW}$ zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen $x_{10\lambda}$ -Kurven. ....	83
Abbildung 67: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{5200KRGBW}$ zwischen der 5200K Referenz und der 5200 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen $y_{10\lambda}$ - Kurven. ....	84
Abbildung 68: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{5200KRGBW}$ zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGB-Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW-Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen $z_{10\lambda}$ -Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. ....	85
Abbildung 69: Farbabstände $\Delta E_{2700KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen $x_{10\lambda}$ -Kurven. ....	87
Abbildung 70: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGB}$ .....	88
Abbildung 71: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGBW}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ .....	88
Abbildung 72: Farbabstände $\Delta E_{2700KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW-Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen $y_{10\lambda}$ -Kurven. ....	89
Abbildung 73: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGB}$ .....	90
Abbildung 74: Farbabstände $\Delta E_{5200KRGBW}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ .....	91
Abbildung 75: Farbabstände $\Delta E_{2700KRGB}$ und $\Delta E_{2700KRGBW}$ zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB-Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen $z_{10\lambda}$ - Kurven. ....	91

Abbildung 76: Farbabstände $\Delta E_{5200\text{KRGB}}$ und $\Delta E_{2700\text{KRGB}}$ .....	93
Abbildung 77: Farbabstände $\Delta E_{5200\text{KRGB}}$ und $\Delta E_{2700\text{KRGB}}$ .....	93
Abbildung 78: Mittlerer Farbabstand $\Delta E_{5200\text{KRGB}}$ für die individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch für ausgewählten Testpersonen (TP).....	95
Abbildung 79: Zuweisung der individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch zu ausgewählten Gruppierung von Testpersonen (TP).....	95
Abbildung 80: Gemittelten Farbabstände $\Delta E_{5200\text{KRGB}}$ für Testperson 1 .....	96
Abbildung 81: $l_{10\lambda}$ , $m_{10\lambda}$ , $s_{10\lambda}$ - Kurven. ....	100
Abbildung 82: Ausschnitt der Farbempfindlichkeitskurven nach einem Abgleich.....	104
Abbildung 83: Gemittelte Amplituden ausgewählter Testpersonen für den Abgleich zwischen der 5200 K-Referenz und der entsprechenden RGB-Einstellung. ....	105
Abbildung 84: Gemittelte Amplituden ausgewählter Testpersonen für den Abgleich zwischen der 5200 K Referenz und der entsprechenden RGBW Einstellung. ....	106
Abbildung 85: Bereiche des gerade wahrnehmbaren Unterschiedes (JND) zwischen der 5200K Referenz und der RGB- Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts).. ....	108
Abbildung 86: Bereich des gerade wahrnehmbaren Unterschiedes (JND) zwischen der 2700 K-Referenz und der RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). ....	109
Abbildung 87: Bereiche JND und JTD für die 5200 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen.....	110
Abbildung 88: Bereiche JND und JTD für die 2700 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen.....	111
Abbildung 89: Bereiche JTD und NTD für die 5200 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen.....	112
Abbildung 90: Bereiche JTD und NTD für die 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellung.....	113
Abbildung 91: Individuelle Punktwolken und Kovarianzellipsen für die Sehbedingung JND für die 5200 K RGB-Einstellung. ....	114
Abbildung 92: Individuelle Punktwolken und Ellipsen für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 5200 K-Referenz und 5200 K RGBW-Einstellung.....	115
Abbildung 93: Individuelle Punktwolken und Ellipsen für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 2700 K-Referenz und 2700 K RGB-Einstellung. ....	116
Abbildung 94: Individuelle Punktwolken und Ellipsen für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 2700 K Referenz und 2700 K RGBW-Einstellung. ....	117

Abbildung 95: Farborte, für Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGB-Einstellung. ....	118
Abbildung 96: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGB). ....	118
Abbildung 97: Farborte, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGBW-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahr-genommen hat.....	119
Abbildung 98: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGBW). ....	119
Abbildung 99: Farborte, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 2700 K-Referenz und der 2700 K RGB-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat. ....	120
Abbildung 100: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGB). ....	120
Abbildung 101: Farborte, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 2700 K-Referenz und der 2700 K RGBW-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat. ....	121
Abbildung 102: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGBW). ....	121
Abbildung 103: Lichtspektren der verwendeten Lichtquellen. ....	137
Abbildung 104: Reflexion der Innenbeschichtung, aufgetragen über die Wellenlänge. ....	138
Abbildung 105: Transmission der diffuse Streuscheibe, aufgetragen über die Wellenlänge. .	138
Abbildung 106: Schaltplan Hardware V1 (Seite 1 von 3).....	139
Abbildung 107: Schaltplan Hardware V1 (Seite 1 von 3).....	140
Abbildung 108: Schaltplan Hardware V1 (Seite 3 von 3).....	141

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hypothese, Alternativhypothese und Ablehnungsbereich des Einstichprobentests..	36
Tabelle 2: Farbwiedergabeindex und Farbtemperatur der verwendeten Referenzlichtquellen. .	56
Tabelle 3: Farbwiedergabeindex und Farbtemperatur der verwendeten Testlichtquellen. ....	57
Tabelle 4: Abkürzung der gemittelten Farbabstände zwischen den Referenzen und den jeweiligen RGB- und RGBW- Einstellungen. ....	67
Tabelle 5: Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200K Einstellungen. ....	69
Tabelle 6: Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700K Einstellungen. ....	71
Tabelle 7: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese3 $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen. ....	73
Tabelle 8: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese 3 $\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen. ....	74
Tabelle 9: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests der Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen. ....	77
Tabelle 10: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen. ....	78
Tabelle 11: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests die Nullhypothese 3 $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$ ..	80
Tabelle 12: Die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese 3 $\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen angegeben. ....	81
Tabelle 13: Die möglichen Gruppierungen von Testpersonen für Abstände $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . ....	97
Tabelle 14: Die für die verschiedenen Testpersonen minimalen Abstände $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ .....	97
Tabelle 15: $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ der modifizierten Spektralwertfunktionen, welche den jeweiligen Testpersonen zugewiesen werden. ....	98
Tabelle 16: $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ der Testpersonen, die unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen.....	99
Tabelle 17: Z $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ der Testpersonen, die den minimalen Abstand berechnen. ....	99
Tabelle 18: Die Abstände $\Delta \bar{m}_{5200K}^{RGB}$ der modifizierten Spektralwertfunktionen für die jeweiligen Testpersonen.. ....	101
Tabelle 19: Die $\Delta \bar{m}_{5200K}^{RGB}$ Funktionen, die für die verschiedenen Testpersonen den minimalen Abstand berechnen. ....	101

Tabelle 20: Farbtemperatur, Farbwiedergabewert, Lichtstrom und Betriebsstrom der verwendeten Lichtquellen.....	137
Tabelle 21: t-Quantile, Vertrauensbereiche.....	142
Tabelle 22: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB bzw. der RGBW Einstellung .....	143
Tabelle 23: Numerische Werte der über elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB bzw. der RGBW Einstellung .....	143
Tabelle 24: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	144
Tabelle 25: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	144
Tabelle 26: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	145
Tabelle 27: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	146
Tabelle 28: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	147
Tabelle 29: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	148
Tabelle 30: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	149
Tabelle 31: Die numerischen Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen.....	150
Tabelle 32: Für die Verschiebung der $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0-5200K}^{RGBW}$ für die Abstände der 5200 K Einstellungen.. .....	151
Tabelle 33: Für die Verschiebung der $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0-5200K}^{RGBW}$ für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	152
Tabelle 34: Für die Verschiebung der $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests sowie für die Nullhypothese $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0-5200K}^{RGBW}$ für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	153
Tabelle 35: Für die Verschiebung der $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothese $\bar{\mu}_{2700K}^{RGB} > \mu_{0-2700K}^{RGBW}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen. ....	154



Tabelle 36: Für die Verschiebung der $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothese $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0-2700K}^{RGBW}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen .	155
Tabelle 37: Für die Verschiebung der $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothese $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0-2700K}^{RGBW}$ für die Abstände der 2700 K Einstellungen.	156
Tabelle 38: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ , $\bar{y}_{10}(\lambda)$ , $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen.....	157
Tabelle 39: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	158
Tabelle 40: Für die modifizierten $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	159
Tabelle 41: Für die modifizierten $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	160
Tabelle 42: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ , $\bar{y}_{10}(\lambda)$ , $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen.....	161
Tabelle 43: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen. ....	162
Tabelle 44: Für die modifizierten $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen .....	163
Tabelle 45: Für die modifizierten $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen .....	164
Tabelle 46: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen .....	165
Tabelle 47: Für die modifizierten $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen .....	166
Tabelle 48: Für die modifizierten $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen .....	167
Tabelle 49: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	168
Tabelle 50: Für die modifizierten $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	169
Tabelle 51: Für die modifizierten $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen .....	170

Tabelle 52: Für die modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen.....	171
Tabelle 53: Für die modifizierten $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen.....	172
Tabelle 54: Für die modifizierten $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte $t$ des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen.....	173
Tabelle 55: Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der RGB 5200 K Einstellung. ....	174
Tabelle 56: Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der RGBW 5200 K Einstellung. ..	175
Tabelle 57: Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der RGB 2700 K Einstellung. ....	176
Tabelle 58: Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der RGBW 2700 K Einstellung....	177
Tabelle 59: Gruppierungen von Testpersonen, für $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . ....	178
Tabelle 60: Gruppierungen von Testpersonen, für $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . ....	178
Tabelle 61: Gruppierungen von Testpersonen, für $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . ....	179
Tabelle 62: Gruppierungen von Testpersonen, für $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . ....	179
Tabelle 63: Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der RGB 5200 K Einstellung. ....	180
Tabelle 64: Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der RGBW 5200 K Einstellung....	181
Tabelle 65: Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der RGB 2700 K Einstellung. ....	182
Tabelle 66: Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der RGBW 2700 K Einstellung....	183
Tabelle 67: Die Abstände $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. ....	184
Tabelle 68: Die Abstände $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. ....	184
Tabelle 69: Die Abstände $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. ....	185
Tabelle 70: Die Abstände $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. ....	185
Tabelle 71: Die Abstände $\Delta\bar{lm}_{5200K}^{RGB}$ zwischen der 5200 K Referenz und der RGB 5200 K Einstellung.. ....	186
Tabelle 72: Die Abstände $\Delta\bar{lm}_{5200K}^{RGBW}$ zwischen der 5200 K Referenz und der RGBW 5200K Einstellung.. ....	187
Tabelle 73: Die Abstände $\Delta\bar{lm}_{2700K}^{RGB}$ zwischen der 2700 K Referenz und der RGB 2700 K Einstellung. ....	188

Tabelle 74: Die Abstände $\Delta \overline{lm}_{2700K}^{RGBW}$ zwischen der 2700 K Referenz und der RGBW 2700 K Einstellung. ....	189
Tabelle 75: Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \overline{lm}_{5200K}^{RGB}$ .....	190
Tabelle 76: Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \overline{lm}_{5200K}^{RGBW}$ .....	190
Tabelle 77: Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \overline{lm}_{2700K}^{RGBW}$ .....	190

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Dimension
$\bar{l}_{10}(\lambda)$	Zapfen L-Typ (Rotempfindlichkeit). 10°-Gesichtsfeld	
$\bar{m}_{10}(\lambda)$	Zapfen M-Typ (Grünempfindlichkeit). 10°-Gesichtsfeld	
$\bar{s}_{10}(\lambda)$	Zapfen S-Typ (Blauempfindlichkeit). 10°-Gesichtsfeld	
$\bar{l}(\lambda)$	Zapfen L-Typ (Rotempfindlichkeit). 2°-Gesichtsfeld	
$\bar{m}(\lambda)$ ,	Zapfen M-Typ (Grünempfindlichkeit). 2°-Gesichtsfeld	
$\bar{s}(\lambda)$	Zapfen S-Typ (Blauempfindlichkeit). 2°-Gesichtsfeld	
$\bar{x}_{10}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Rot (und Blau) Anteile. 10°-Gesichtsfeld (1964)	
$\bar{y}_{10}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Grün Anteile. 10°-Gesichtsfeld (1964)	
$z_{10}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Blau Anteile. 10°-Gesichtsfeld (1964)	
$\bar{x}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Rot (und Blau) Anteile. 2°-Gesichtsfeld (1931)	
$\bar{y}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Grün Anteile. 2°-Gesichtsfeld (1931)	
$\bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion der Blau Anteile. 2°-Gesichtsfeld (1931)	
$I(\lambda)$	spektrale Leistung der Lichtquelle	
LMS	Tristimuluswert	
$L^*$	Die $L^*$ -Achse des $L^*a^*b^*$ -Farbraumes. Sie beschreibt die Helligkeit einer Farbe	
$a^*$	Die $a^*$ -Achse des $L^*a^*b^*$ -Farbraumes. Sie beschreibt den Grün-Rot- Anteil einer Farbe	
$b^*$	Die $b^*$ -Achse des $L^*a^*b^*$ -Farbraumes. Sie beschreibt den Gelb-Blau-Anteil einer Farbe	

$L_{99}$	Helligkeitswert einer Farbe, berechnet nach dem DIN99 Modell	
$a_{99}$	Grün-Rot-Anteil einer Farbe, berechnet nach dem DIN99 Modell	
$b_{99}$	Gelb-Blau-Anteil einer Farbe, berechnet nach dem DIN99 Modell	
$k_E$	Maß für den Einfluss geänderter Betrachtungsbedingungen	
$D_{\tau, \max}$	Dichteverteilung der Zapfen des menschlichen Sehapparates	
$f_s$	Sichtfeld	Grad °
$H_0$	Nullhypothese	
$H_1$	Gegenhypothese	
$\mu_0$	Zielwert	
$\mu$	Testgröße	
$\bar{x}$	Mittelwert	
$s$	Standardabweichung	
$t$	Prüfwert	
$\alpha$	Signifikanzniveau	
$p_1^2$	Primäre Ellipsenachse	
$p_2^2$	Sekundäre Ellipsenachse	
$\rho$	Korrelationskoeffizient	
$\alpha$	Rotationswinkel, der die Drehung der Ellipse im kartesischen Koordinatensystem angibt	Grad °
$\lambda$	Wellenlänge	nm
$h$	Planck-Konstante	Js
$\varepsilon_{\text{ph}}$	Photonenenergie	eV

$d_n$	Gangunterschied zwischen Wellen
$g$	Gitterkonstante
$n$	Ordnung des Hauptmaximums
$\vec{k}$	Wellenvektor
$\bar{a}'_o$	Gemittelte $a_{99}$ -Werte einer Testperson.
$\bar{b}'_o$	Gemittelte $b_{99}$ -Werte einer Testperson.
$\bar{a}'$	Gemittelte $a_{99}$ -Werte aller Testpersonen.
$\bar{b}'$	Gemittelte $b_{99}$ -Werte aller Testpersonen.
$\Delta\bar{E}_{99}$	Farbabstand zwischen dem Farbort der Referenz- und dem der Testlichtquelle, berechnet über $\bar{a}'$ und $\bar{b}'$
$\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Gemittelte Abstände zwischen der 5200 K Kompaktleuchtstofflampe und der 5200 K RGB Einstellung
$\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Gemittelte Abstände zwischen der 5200 K Kompaktleuchtstofflampe und der 5200 K RGBW Einstellung
$\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Gemittelte Abstände zwischen der 2700 K Halogenlampe und der 2700 K RGB Einstellung
$\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Gemittelte Abstände zwischen der 2700 K Halogenlampe und der 2700 K RGBW Einstellung
$\Delta\bar{E}^{RGB}$	Abstand zwischen einer der Referenzen und einer der RGB Testlichtquellen. (2700 K oder 5200 K)
$\Delta\bar{E}^{RGBW}$	Abstand zwischen einer der Referenzen und einer der RGBW Testlichtquellen. (2700 K oder 5200 K)
$\mu_{0,1964}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und der Testlichtquelle unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964
$\mu_{0,2700K}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und eine der Testlichtquellen für eine Farbtemperatur von 2700 K. Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße

wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet

$\mu_{0\_5200K}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und eine der Testlichtquellen für eine Farbtemperatur von 5200 K. Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet
$\mu_0^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (allgemein)
$\mu_{0\_n}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der-Testlichtquellen unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion liegt näher an der Position der Originalkurven
$\mu_{0\_2700K}^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet
$\mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964
$\mu_{0\_1964\_2700K}^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964
$\mu_{0\_n\_5200K}^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion liegt näher an der Position der Originalkurven
$\mu_{0\_n\_2700K}^{RGB}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion liegt näher an der Position der Originalkurven
$\mu_0^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (allgemein)
$\mu_{0\_5200K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet

$\mu_{0\_2700K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (2700K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet
$\mu_{0\_1964\_5200K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964
$\mu_{0\_1964\_2700K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung der Normspektralwertfunktionen von 1964
$\mu_{0n\_5200K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion liegt näher an der Position der Originalkurven
$\mu_{0n\_2700K}^{RGBW}$	Zielwert ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion liegt näher an der Position der Originalkurven
$\mu_{\text{alternativ}}$	Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und der Testlichtquelle unter Verwendung einer alternativen Spektralwertfunktion
$\mu_{5200K}$	Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und eine der Testlichtquellen für eine Farbtemperatur von 5200 K
$\mu^{RGB}$	Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (allgemein)
$\mu_w$	Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der Testlichtquellen unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion ist weiter entfernt von der Position der Originalkurven
$\mu_{5200K}^{RGB}$	Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle



und einer der RGB-Testlichtquellen (5200 K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet

$\mu_{2700K}^{RGB}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700 K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet

$\mu_{w\_5200K}^{RGB}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion ist weiter entfernt von der Position der Originalkurven

$\mu_{w\_2700K}^{RGB}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion ist weiter entfernt von der Position der Originalkurven

$\mu_{alternativ\_5200K}^{RGB}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung alternativer Spektralwertfunktionen

$\mu_{alternativ\_2700K}^{RGB}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGB-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung alternativer Spektralwertfunktionen

$\mu_{5200K}^{RGBW}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K). Für den Zielwert und die entsprechende Testgröße wird dieselbe Spektralwertfunktion verwendet

$\mu_{alternativ\_5200K}^{RGBW}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung alternativer Spektralwertfunktionen

$\mu_{alternativ\_2700K}^{RGBW}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (2700 K) unter der Verwendung alternativer Spektralwertfunktionen

$\mu_{w\_5200K}^{RGBW}$  Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K) unter der

Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion ist weiter entfernt von der Position der Originalkurven

$\mu_{W,2700K}^{RGBW}$

Testgröße ist der Abstand zwischen der Referenzlichtquelle und einer der RGBW-Testlichtquellen (5200 K) unter der Verwendung verschobener Spektralwertfunktionen. Die verschobene Funktion ist weiter entfernt von der Position der Originalkurven

---

## Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem instrumentellen Farbabstand, der entsteht, wenn zwei Lichtquellen mit gleichem Farbort, aber unterschiedlichem Spektrum, visuell aufeinander abgeglichen werden. Es wird mit Hilfe physiologischer Tests untersucht, wie stark sich die teilnehmenden Testpersonen in ihrer Farbwahrnehmung unterscheiden. Des Weiteren wird verglichen, wie sich die Verwendung konventioneller und alternativer Spektralwertfunktionen auf die Berechnung der Farborte und auf den Farbabstand zwischen den visuell abgeglichenen Lichtquellen auswirken.

Die bisherigen Ergebnisse dieser Arbeit zeigen trotz inter- und intrapersoneller Unterschiede, dass die Testpersonen tendenziell einen vergleichbaren farblichen Unterschied zwischen instrumentell abgeglichenen Lichtquellen erkennen. Die Größe des Farbabstandes und die Streuung der eingestellten Farborte sind dabei abhängig von den zu vergleichenden Lichtquellen.

Der Farbabstand kann dabei durch die Verwendung geeigneter Spektralwertfunktionen beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen zum Beispiel, dass der Einsatz alternativer Spektralwertfunktionen anstelle der gebräuchlichen Normspektralwertfunktionen den Abstand verringern kann. Dabei ist die Auswahl einer passenden Funktion abhängig von dem abgeglichenen Lichtspektrum.

Obwohl die bisherigen Ergebnisse für die verschiedenen Testpersonen vergleichbare Tendenzen bei der Farbwahrnehmung erkennen lassen, machen die inter- und intrapersonelle Streuung der eingestellten Farborte die Definition eines allgemeingültigen Bereichs des visuellen Abgleiches schwierig. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass unterschiedliche Lichtquellen mit unterschiedlichen Spektralwertfunktionen bewertet werden müssen, um den Farbabstand möglichst klein zu halten.

---

# 1 Einleitung und Motivation

Die vom Menschen wahrgenommenen Farben entstehen, wenn Licht durch die Reflexion an Oberflächen auf das Auge fällt. Teile der optischen Strahlung werden dabei reflektiert, absorbiert und transmittiert. Abhängig davon, welche Wellenlängen reflektiert werden, wird vom Menschen eine bestimmte Farbe wahrgenommen.

Ein Problem bei der heutigen Farbmessung ist die Metamerie. Unterschiedliche Lichtspektren können den gleichen Farbreiz hervorrufen. So kann z.B. eine homogene, farbige Fläche unter verschiedenen Lichtarten gleich aussehen, während eine andere Farbe unter den gleichen Lichtarten unterschiedlich aussieht.

Allerdings entspricht ein visueller Abgleich nicht notwendigerweise einem instrumentellen Abgleich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Lichtquellen als unterschiedlich wahrgenommen werden können, auch wenn ein Farbmessgerät für unterschiedliche Lichtquellen denselben Farbart anzeigt.

Ein Grund dafür ist die unterschiedliche Wahrnehmung der Betrachter aufgrund der unterschiedlichen Genotypen. So ist unter anderem die Anzahl der Photorezeptoren individuell verschieden und deren Empfindlichkeit altert unterschiedlich schnell. Es kommt zu einer natürlichen Streuung zwischen Beobachtern. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Tagesform. So ist bekannt, dass eine Testperson unter gleichen Bedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine Situation unterschiedlich wahrnimmt und beurteilt. Da Farbmessgeräte auf den Normspektralwertfunktionen eines Standardbeobachters basieren, wird es mit den in den CIE-Normen empfohlenen Berechnungsmethoden nicht möglich sein, eine hundertprozentige Übereinstimmung zwischen dem instrumentellen und dem visuellen Abgleich zu erreichen.

---

## 1.1 Aktueller Forschungsstand

---

Im Folgenden soll auf den aktuellen Forschungsstand hinsichtlich der Modellierung bzw. der Berechnung und der Darstellung der Farbkoordinaten eingegangen werden. Der Mensch ist in der Lage bei einem direkten Vergleich kleinste Variationen in der Lichtfarbe wahrzunehmen. Dabei hängt die Wahrnehmung sowohl von den individuellen Beobachtern als auch von den zu vergleichenden Lichtspektren ab. Dieser Effekt ist schon seit längerem bekannt und stellt bei der Bewertung von Licht und Körperfarben ein großes Problem dar.

### Farbunterschiede bei LEDs

Seit einigen Jahren haben sich LEDs in der Allgemeinbeleuchtung als Alternative zu konventionellen Lichtquellen wie Halogen- und Fluoreszenzleuchten behauptet und werden diese in den kommenden Jahren voraussichtlich ganz aus dem Markt verdrängen. Sie sind nicht nur effizienter und langlebiger, aufgrund ihrer relativ leichten Ansteuerbarkeit und geringen Größe sind sie auch weitaus flexibler als die konventionellen Technologien. Allerdings führt ihre geringe

---

Größe auch zu einigen Nachteilen welche sich auf die Qualität einer Leuchte und somit auf die Akzeptanz der LED als Leuchtmittel auswirkt. Um Leuchten mit ausreichend Lichtstrom zu fertigen, werden in der Regel mehrere LED Chips benötigt. Toleranzen bei diversen Faktoren wie Leuchtstoffalterung und dem thermischen Management können zu Farbunterschieden bei den einzelnen LEDs führen. Eine Studie durch das Department of Energy (DOE) der USA hat festgestellt, dass die Farbortverschiebung fertigungsbedingt stark variieren kann [80]. So kann die maximale Farbortverschiebung für ein LED-Produkt nach 25000 Stunden stabil bei einem  $\Delta u^*v^*$  von 0,003 liegen, während andere Hersteller bereits nach 6000 Stunden ein  $\Delta u^*v^*$  von 0,007 aufweisen [80].

Eine Studie am Light Research Center der USA hat gezeigt, dass es bei LEDs gleicher Lichtfarbe zu deutlichen Farbunterschieden kommen kann [1]. Farbunterschiede können dabei in Größenordnungen von bis zu 12-step-MacAdam Ellipsen auftreten. Um die farblichen Inhomogenität innerhalb eines Systems gering zu halten werden LEDs vom Hersteller vorsortiert.

Ein weiteres Problem neben der fertigungsbedingten Varianz und der unterschiedlichen Alterung ist das Dimmen von LEDs. Eine Studie am Light Research Center wies eine Abhängigkeit zwischen dem Lichtspektrum und dem Dimmen mit Puls-Weiten-Modulation nach [2]. Dyble et al. stellten fest, dass sich der Farbort für weiße LEDs kaum ändert. Das Dimmen von RGB-LEDs allerdings führte zu deutlichen Verschiebungen.

### **Wahrnehmung von Farbabständen**

Fertigungsbedingt existieren bei der Herstellung von LEDs Unterschiede in deren spektralen Verläufen, was sich auf die Berechnung der Farbkoordinaten auswirkt [3]. Die geläufigste Methode, die Farbunterschiede von LEDs innerhalb eines Systems gering zu halten, ist eine Vorsortierung, dem sogenannten Binning. Die Farbtoleranzen der LEDs basieren dabei auf den MacAdam Ellipsen.

MacAdam war einer der Ersten, der sich mit dem Thema zur Wahrnehmung von Farbdifferenzen auseinandergesetzt hatte. Mac Adam stellte 1942 [4] bei seinen Untersuchungen eine ellipsenartige Verteilung der visuellen Abgleiche um den Referenzpunkt fest. Er schlussfolgerte, dass die wahrnehmbare Farbdifferenz mit der Standardabweichung um diesen Punkt zusammenhängen müsse. In Zusammenarbeit mit Brown [5] wurden die Untersuchungen 1949 fortgeführt. MacAdam und Brown hatten sich bis zu dem Zeitpunkt auf ein 2°-Beobachterfeld konzentriert.

Da ein 2°-Beobachterfeld in der Praxis sehr unüblich ist, wiederholte Brown 1957 die Untersuchungen für ein 10°-Beobachterfeld [6]. Dabei machte er zwei wesentliche Beobachtungen. Zum einen stellte er fest, dass die Ellipsen mit dem größer werdenden Beobachterfeld kleiner wurden, allerdings war ihrer Orientierung dieselbe wie für das 2°-Beobachterfeld. Das bedeutet, dass die Wahrnehmungsschwelle sinkt, während die Empfindlichkeit zunimmt.

Bieske hat ihren Untersuchungen zur Wahrnehmung von Licht und Körperfarben versucht einen Bereich zu definieren, in dem ein farblicher Unterschied zu erkennen ist [47]. So wurde in ihren Untersuchungen die Wahrnehmungsschwelle bestimmt, indem Testpersonen die sprunghafte Änderung der Farbtemperatur mit Kriterien „gerade erkannt“, „sicher gesehen“ und als

---

„störend empfunden“ bewerteten. In einem anderen Versuch wurden 4000 K Leuchtstofflampen miteinander verglichen. Durch die Verwendung von zusätzlichen roten, grünen oder blauen Leuchtstofflampen wurde das Lichtspektrum der einen Leuchte schrittweise verändert, bis von einer Testperson ein Farbunterschied als „gerade erkannt“, „sicher gesehen“ und als „störend empfunden“ erkannt wurde. Die Untersuchungen zeigen im  $u'v'$ -Farbraum, dass ein gerade wahrzunehmender farblicher Unterschied bei einem Abstand  $\Delta u'v'$  von etwa 0,0016 zu erkennen ist. Bieske stellte des Weiteren fest, dass sich der Farbabstand mit der Farbtemperatur ändert [47].

Oichermann [7] konnte 2009 in seinen Versuchen zum Vergleich von Oberflächen mit Displayfarben beweisen, dass die bisher unter Laborbedingungen ermittelten Abweichungen zwischen dem visuellen und dem berechneten Abgleich auch für die praktische Anwendung von Bedeutung sind. Er stellte in seinen Untersuchungen Abweichungen vor allem für bläuliche Farben fest.

In anderen Arbeiten haben P. Manninen and P. Orreveläen [46] diverse LEDs hinsichtlich wahrnehmbarer Farbunterschiede untersucht, wobei LEDs mit einem vergleichbaren spektralen Verlauf verglichen wurden. Für den  $u'v'$ -Farbraum wurde ein kleinster wahrnehmbarer Farbunterschied  $\Delta u'v'$  von 0,003 für den gelblich orangen Bereich und 0,004 für den rötlichen Bereich festgestellt.

Die Ergebnisse von MacAdam bilden die Grundlage für die MacAdam Ellipsen, welche in der heutigen Lichttechnik verwendet werden, um die Gleichfarbigkeit bzw. Farbunterschiede von Lichtspektren zu beurteilen. Allerdings bestand die Vermutung, dass diese Ellipsen nicht für Lichtquellen geeignet sind. MacAdam hatte seine Versuche nur für eine einzelne Farbtemperatur (6774 K-Standard für Tageslicht) durchgeführt.

Im technischen Report der CIE [56] wurde deswegen darauf hingewiesen, dass bei der Beurteilung von Farbunterschieden die Umgebung eine wesentliche Rolle spielt. An der Universität Ilmenau wurden hierzu Untersuchungen durchgeführt, ob die Ellipsen für die Beurteilung von Lichtfarben nicht geeignet sind. Kramer beschäftigte sich in seiner Arbeit mit der Frage, wie sich die Ellipsen in Abhängigkeit vom Vergleichsspektrum verhalten. Des Weiteren führte Kramer seine Versuche für ein  $10^\circ$ -Beobachterfeld durch, da das größere Feld mehr praktische Relevanz besitzt [37]. Er konzentrierte sich außerdem auf die verschiedenen Weißtöne, die sich entlang des Planckschen Kurvenzuges befinden und ein vergleichbares Lichtspektrum aufweisen. Kramer stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die Ellipsenform unabhängig vom Weißton ist, die Ellipsenorientierung sich jedoch mit dem Weißton ändert.

Am Light Research Center des Rensselaer Polytechnic Institute wurden 2004 Untersuchungen hinsichtlich der Toleranzen von Farbtoleranzen durchgeführt, um das auf den MacAdam Ellipsen basierende Binning von weißen LEDs zu verbessern [77]. Man unterschied dabei zwischen zwei Szenarien: Das erste Szenario geht davon aus, dass zwei LED Lampen direkt sichtbar nebeneinander oder indirekt über eine weiße Fläche verglichen werden. Das zweite Szenario geht von einer indirekten Beleuchtung zweier weißer LED Lichtquellen aus, welche eine komplexe Szenerie mit mehreren Farben beleuchten. Man kam zu dem Schluss, dass die Szenerie einen

---

wesentlichen Einfluss auf die Toleranzen hat. Bei einem direkten side-by-side Vergleich von Lichtquellen bzw. einem Vergleich der Lichtquelle auf einer achromatischen Fläche waren die 2-step MacAdam Ellipsen ausreichend für das Binning von weißen LEDs. Bei einer komplexen Szene können die 4-step MacAdam Ellipsen als ausreichend erachtet werden.

## Farbräume

Ein wesentliches Problem bei der Darstellung von Farborten ist die Gleichabständigkeit in dem gewählten Farbraum. Innerhalb eines Farbraumes sollte der Abstand zwischen der Referenzfarbe und einer Testfarbe in allen Richtungen gleich sein. MacAdam stellte in seinen Untersuchungen zur Wahrnehmung von Farbdifferenzen im von der CIE festgelegten Yxy-Farbraum eine ellipsenartige Verteilung der Vergleichsfarben um die Referenz herum fest [4]. Diese Art der Verteilung macht die Beschreibung des wahrgenommenen Farbunterschiedes schwierig. Um die Gleichabständigkeit zu verbessern wurden mehrere Farbräume und Farbabstandsformeln entwickelt. Dabei sind Farbräume wie der u,v-Farbraum oder der  $u',v'$ -Farbraum eher für die Beurteilung von Lichtfarben ausgelegt, während Farbräume wie CIELAB oder CIECAM02 eher für Festkörperfarben gedacht sind.

In den letzten Jahren hat man versucht vor allem den CIELAB- Farbraum zu verbessern. Obwohl der CIELAB- Raum allgemein akzeptiert wird, werden unter Verwendung von einfachen Farbabstandsformeln wie dem euklidischen Abstand die empfindungsgemäß wahrgenommenen Farbunterschiede nur unzureichend wiedergegeben [8] [9] [10] [50]. So werden z.B. Farbänderungen für gesättigte Farben weniger stark empfunden als für ungesättigte Farben. Um diese Unzulänglichkeiten zu kompensieren wurde die Formel zur Berechnung des Farbabstandes auf Basis des euklidischen Abstandes erweitert. So entstanden Modelle wie die komplexe CIE94- und CIEDE2000-Formeln.

Ein anderer Ansatz, die empfundene Farbänderung möglichst einfach und unabhängig von der Sättigung zu beschreiben, war die Anwendung einer Farbraumtransformation. Dabei sollte basierend auf CIELAB ein Farbraum entwickelt werden, der über eine Nichtlinearität die Farbabstandsformel CIE94 annähert. Der Vorteil dieses Farbraumes sollte die Anwendbarkeit der einfachen euklidischen Abstandsformel sein [11]. Erste Untersuchungen konnten nachweisen, dass der DIN99 Farbraum trotz seiner, im Vergleich zu den CIE94- und CIEDE2000- Formeln, geringeren Komplexität vergleichsweise gute Ergebnisse liefert.

Luo et.al. hat 2014 die geläufigsten Farbräume miteinander verglichen [12]. Seine Untersuchungen ergaben, dass für den direkten Vergleich von weißen Lichtquellen der  $u',v'$ -Farbraum die gleichmäßigsten Abstände liefert.

## Spektralwertfunktionen

Es gab in vergangenen Jahren bereits Versuche, den mathematischen Farbabgleich an den visuellen Abgleich anzupassen um auf diese Weise die sich ergebende Farbdifferenz zu verringern.

---

Es existieren in der Farhentheorie zwei Modelle der Farbwahrnehmung. Die Gegenfarbentheorie basierend auf den Arbeiten von Hering [13] und die trigonometrische Farbentheorie basieren auf den Arbeiten von Young [14] und Helmholtz [15].

Hering ging bei der Entwicklung seiner Gegenfarbentheorie [13] davon aus, dass Farbeindrücke wie gelbliches Blau oder rötliches Grün nicht vorstellbare seien. Er schlussfolgerte, dass auf der Netzhaut drei getrennte Prozesse mit einem hemmenden und einem anregenden Teil stattfinden würden, welche nach einem Gleichgewicht streben.

Das trichromatische Farbmodell versucht die Farbwahrnehmung über die sogenannten Spektralwertfunktionen auf Zapfenebene mathematisch zu beschreiben. Die Modellierung über die Spektralwertfunktionen beruht auf der Annahme, dass jedes farbmimetrische System dreidimensional sein muss. Wenn Licht einer bestimmten Wellenlänge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf einen der drei Zapfentypen trifft und anregt, führt ein „Vergleich“ der angeregten Zapfen zu dem Farbeindruck [16] [57].

Maxwell hatte diesen Zusammenhang vermutet und bereits 1860 versucht die Zapfentypen, welche wir für unsere Farbwahrnehmung benötigen, über drei Spektralwertfunktionen zu beschreiben [17].

Weitere Messungen zum Farbreiz wurden sowohl von Guild (1931) [18] als auch von Wright (1928/29) [19] unabhängig voneinander durchgeführt. Obwohl Guild und Wright in ihren Versuchen unterschiedliche Primärlichtquellen verwendeten, kamen sie zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen bildeten die Grundlage für die 1931 von der CIE als Standard festgelegten Normspektralwertfunktionen für ein 2°-Beobachterfeld.

In den Folgejahren stellten Judd (1949) und Stiles (1955) bei den Normspektralwertfunktionen allerdings erste Mängel fest. Judd [20] bemerkte bei seinen Untersuchungen, dass die Normspektralwertfunktionen die Blauempfindlichkeit im Bereich unter 430 nm zu wenig gewichtet wurden. Die Untersuchungen von Stiles [21] hingegen wiesen Unterschiede zwischen den von ihm ermittelten Funktionen und den von der CIE anerkannten 2°-Funktionen vor allem bei der Blau- und Grün-Empfindlichkeit auf. Außerdem erweiterte Stiles seine Versuche auf ein 10°-Beobachterfeld da sich die Untersuchungen von Guild und Wright auf ein 2°-Beobachterfeld beschränkten. Stiles vermutete, dass sich aufgrund der abnehmenden Konzentration der Zapfen um die Makula mit zunehmendem Sehfeld auch die spektrale Empfindlichkeit ändern würde. Seine Untersuchungen bestätigten unterschiedliche Verläufe für das 2°- und 10°-Beobachterfeld. Nach einigen Modifikationen unter der Leitung von Judd [22] wurden 1964 die Kurven für den 10°-Beobachter als Standard für von der CIE anerkannt [23].

Zwei anschließende Untersuchungen der Normspektralwertfunktionen für das 10°-Beobachterfeld durch Wright und Wyszecki [24] sowie Stiles und Wyszecki [25] zeigten allerdings erneut Mängel auf. Bei einem Farbabgleich wurden deutliche Unterschiede zwischen den Testergebnissen und den über die Normspektralwertkurven berechneten Farbortkoordinaten festgestellt. Besonders offensichtlich waren die Diskrepanzen in den bläulichen Bereichen.

Thornton [26] stellte 1998 fest, dass die Normspektralwertfunktionen bei metameren Lichtspektren mit unterschiedlichen spektralen Anteilen versagen. Bei einem Vergleich unter-



---

schiedlicher Lichtspektren nahmen die Testpersonen die Testflächen trotz gleicher Farbkoordinaten als unterschiedlich farbig wahr.

Dieses Phänomen wurde 2004 durch Borbely und Schanda [27] in ihren Untersuchungen zum Abgleich von LED-Lichtspektren auf Temperaturstrahler nochmals bestätigt. Trotz eines visuellen Abgleiches wurden deutliche Farbunterschiede festgestellt.

Um die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges so genau wie möglich zu beschreiben, wurde mit der CIE-Empfehlung CIE170-1:2006 [28] ein erneuter Versuch unternommen, die Spektralwertfunktionen zu verbessern. Die CIE-Empfehlung sah dabei vor, die Ergebnisse aus den Untersuchungen von Stiles und Burch [29] zu „Color Matching Functions“ für das 10°-Gesichtsfeld mit den Erkenntnissen von Stockmann und Sharpe [30] [31] zu kombinieren, welche sich mit den Empfindlichkeiten der Zapfen auseinandersetzen.

Bieske und Csuti [32] untersuchten 2007 die Qualität der von der CIE170-1:2006 empfohlenen neuen Funktionen. Ihre Untersuchungen ergaben unter Verwendung der CIE2006 Kurven anstelle der CIE1931 Kurven eine Verbesserung des Abgleiches im blauen Bereich dar, allerdings konnte die Diskrepanz zwischen dem visuellen Abgleich und den berechneten Farbkoordinaten nicht völlig beseitigt werden.

In weiterführenden Untersuchungen durch Schanda und Csuti und später durch Csuti wurde die verbesserte Modellierung durch die CIE2006 Funktionen nochmals bestätigt. Hierzu führten Schanda und Csuti 2009 Versuche durch, in welchen LED Lampen und Halogenmetalldampflampen visuell aufeinander abgeglichen wurden [54]. Csuti setzte 2011 die Untersuchungen fort, indem er verschiedene LED-Lichtspektren miteinander verglich [55]. Auch hier blieben die Diskrepanzen zwischen den visuellen und den berechneten Farbabgleichungen vorhanden.

Sarkar [33] analysierte 2011 die Datensätze von Stiles und Burch mit den Normspektralwertfunktionen von 1964. Sarkar stellte dabei fest, dass sich die Verbesserung auf die Blauempfindlichkeit beschränkt, während die Rot- und Grünempfindlichkeit keine Verbesserung erfahren. Eine mögliche Begründung ist, dass es drei Gruppen Normalsichtiger gibt, bei denen die L- und M- Zapfenempfindlichkeiten verschoben sind.

Schanda und Csuti versuchten die Spektralwertfunktionen weiter zu verbessern. Unter anderem haben sie die  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurven der CIE2006 Funktionen entlang der Wellenlänge verschoben, um den Abstand zwischen den Farborten unterschiedlicher Lichtspektren zu minimieren [54] [55]. Diese Ergebnisse lieferten zwar für die dafür konzipierten Tests gute Ergebnisse, allerdings war die Übertragung der modifizierten Normspektralwertfunktionen auf andere Versuche nur bedingt erfolgreich, da sie den Farbabstand gar nicht beeinflussten oder sogar verschlechterten.

Schanda hat die Theorie aufgestellt, dass die Darstellung des Farbabstands zwischen zwei Lichtquellen in einem Farbraum durch die Veränderung der Spektralwertfunktion von Stockmanns verbessert werden kann [54], [55]. Hierzu hat er die  $z(\lambda)$ -Kurve zu den kürzeren Wellenlängen verschoben.

Basierend auf den Erkenntnissen von Schanda et al. wurden am Fachgebiet Lichttechnik der Universität Ilmenau Untersuchungen zur Verbesserung des Farbabgleiches durchgeführt. Pols-

---

ter beschäftigte sich hierzu in ihrer Arbeit [36] mit der Modellierung neuer Spektralwertfunktionen zur korrekten Bewertung von LED-Spektren. Polster stellte in ihren Untersuchungen fest, dass bei einem visuellen Abgleich von Lichtquellen mit unterschiedlichem Spektrum der Farbraumfehler sowie die interpersonelle Streuung mit steigender Farbtemperatur ebenfalls zunehmen. Allerdings konnte sie die Erkenntnisse von Schanda bestätigen, dass die kurzwelligen Spektralanteile den größten Einfluss auf den Farbraumfehler haben. Des Weiteren bewies sie, dass die von Schanda entwickelten Kurven im Vergleich zu den Normspektralwertfunktionen den Farbraumfehler für einige Abgleiche zwar eine Verbesserung darstellen, diesen aber nicht zufriedenstellend reduzieren. So waren nach einem berechneten Farbabweich für diverse Testpersonen nach wie vor farbliche Unterschiede zwischen den Referenzquellen und dem Testspektrum erkennbar.

Die Untersuchungen von Polster waren bei Entstehung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen, so dass die neu modellierten Spektralwertfunktionen dieser Arbeit nicht zur Verfügung standen.

## **Testmethoden**

Visuelle Untersuchungen sind von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängig. Neben der Art des Testaufbaus können Umwelteinflüsse und Tagesform der Versuchspersonen einen wesentlichen Einfluss auf die Testergebnisse haben.

Bei einem Side-by-Side Abgleich von Lichtquellen zum Beispiel macht es einen großen Unterschied, ob die zu vergleichenden Lichtquellen räumlich voneinander getrennt sind [37]. Dies kann die Beurteilung und Modellierung von Spektralwertfunktionen stark beeinflussen.

Der trigonometrische Farbabweich geht von einer Kombination aus drei Farbreizen aus und folgt dem Grundsatz der Additivität. So entspricht eine Mischung von zwei Reizen der Überlagerung der beiden Abgleichkombinationen. Durch die Ermittlung der Intensitäten der drei Primärquellen kann das Farbabweichsverhalten einer Person beschrieben werden. Auf diesem Prinzip sind die gängigen Abgleichstests ausgelegt [38].

Crawford hat 1965 die verschiedenen Testmethoden für den visuellen Abgleich miteinander verglichen [34]. Er konnte nachweisen, dass die Ergebnisse für die für die jeweiligen Testmethoden unterschiedlich ausfallen. Besonders im Bereich der gesättigten Lichtfarben lieferten seine Untersuchungen keine sinnvollen Ergebnisse.

Oichermann [7] hat 2009 in seiner Veröffentlichung zusammengefasst, dass die ermittelten Spektralwertfunktionen stark von der Abgleichmethode abhängen.

---

## **1.2 Problemstellungen**

---

Um den farblichen Eindruck einer Lichtquelle beschreiben zu können, muss zunächst dessen Farbort in einem Farbraum bestimmt werden. Hierzu wird das Lichtspektrum mit den Normspektralwertfunktionen verrechnet, welche die Dichteverteilung der farbempfindlichen Photorezeptoren des menschlichen Auges beschreiben und auf einen Normalbeobachter bezo-

gen sind. In den CIE Normen wird für den Normalbeobachter zwischen einem 2° und 10° Sichtfeld unterschieden [45].

Diese Arbeit befasst sich mit der Problematik des vorhandenen Farbunterschiedes zwischen visuell abgeglichenen Quellen sowie den Schwierigkeiten der personenabhängigen Wahrnehmung beim Vergleich unterschiedlicher Lichtquellen.

Die menschliche Farbwahrnehmung wird durch die spektralen Eigenschaften des Lichts und die Reflexionseigenschaften von Objektoberflächen festgelegt. Dabei erzeugen Farbreize in Abhängigkeit von den Sehbedingungen einen bestimmten Farbeindruck [38]. Der Farbeindruck kann über verschiedene Berechnungsmethoden bestimmt und in einem Farbraum dargestellt werden.

Im Jahre 1931 definierte die Internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale d'Eclairage) den Standardbeobachter für Farbmeterik und das 1931 CIE Farbmeteriksystem [39]. Das System beschreibt die Relation zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung und dem physikalischen Farbreiz.

Die Grundlagen für dieses System sind auch heute noch gültig und die industriellen Farbbeurteilungssysteme basieren auf der CIE Farbmeterik. Der farbliche Eindruck einer Lichtquelle kann über dessen Farbkoordinaten in einem Farbraum (z.B. dem von der CIE erstellen XYZ-Farbraum) dargestellt werden. Zur Zuordnung des Farbortes einer Lichtquelle sind im Wesentlichen das Spektrum der Lichtquelle und die Spektralwertfunktionen notwendig. Die prinzipiellen Berechnungsschritte zur Bestimmung der Farbkoordinaten einer Lichtquelle sind in Abbildung 1 dargestellt.

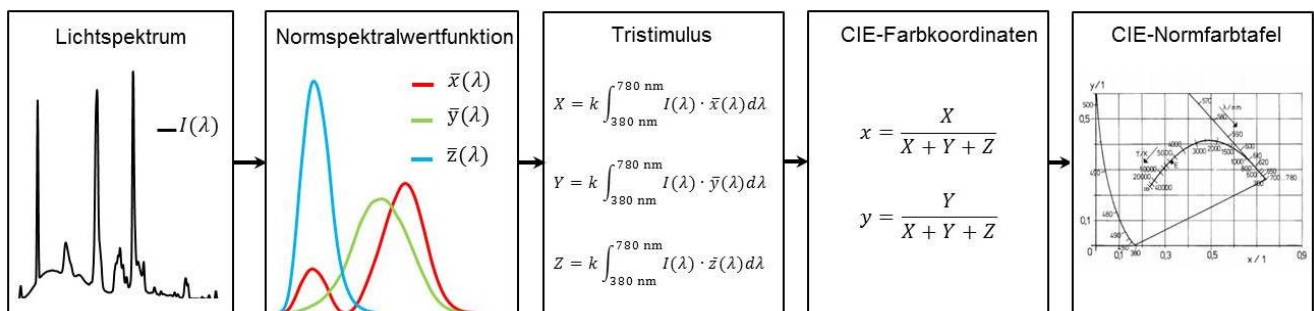


Abbildung 1: Prinzipielle Schritte zur Berechnung des Farbortes

Das Spektrum einer Lichtquelle wird mit den CIE Normspektralwertfunktionen bewertet, welche die Grundlage für das CIE-Normvalenzsystem bilden. Die geläufigsten Funktionen stammen aus den Jahren 1931 für ein 2° Gesichtsfeld und 1964 für ein 10° Gesichtsfeld. Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Farbwahrnehmung haben bereits zu einer Reihe von Verbesserungsvorschlägen und Empfehlungen geführt. Diese dienen der notwendigen Anpassung entsprechender Größen an die jeweiligen Messbedingungen und Sehaufgaben. Das Fundament für die Normspektralwertfunktionen bilden die Untersuchungen von W. David Wright (1928) und John Guild (1931) [41], in welchen die individuellen Funktionen von verschiedenen Testpersonen bestimmt wurden. (Siehe Abschnitt 2.3 Abbildung 7).

---

Theoretisch können auf diese Art und Weise verschiedene Lichtspektren konstruiert werden, die den gleichen Farbort haben, aber unterschiedliche spektrale Verläufe besitzen. Diese Überlegung basiert auf dem dritten Graßmannschen Gesetz, das wie folgt lautet:

„Der Farbton einer durch additive Farbmischung entstandenen Farbe hängt nur vom Farbeindruck der Ausgangsfarben, nicht jedoch von deren physikalischen (spektralen) Zusammensetzung ab“ [39]. Das Gesetz sagt aus, dass das Mischverhalten von Farben mit gleichem Farbeindruck aber unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung allein aufgrund des Farbeindrucks genau beschrieben werden kann. Ebenso können keine Rückschlüsse auf die spektrale Zusammensetzung einer gemischten Farbe gezogen werden.

In der Praxis ist es allerdings so, dass die wahrgenommenen Unterschiede nicht immer mit der Gleichheit der gemessenen Normfarbwerte XYZ beschrieben werden können, wie es vor allem für weiße Lichtspektren mit hohen lokalen Maxima (Peaks) der Fall ist. Die Ursache dafür ist der spektrale Verlauf der Spektren. Fehlende Intensitäten bei bestimmten Wellenlängen führen zu einer Veränderung vom Farbeindruck im Vergleich zu dem, was die Normfarbwerte XYZ voraussagen. Diese „Änderung“ ist für die verschiedenen Farben anders, gilt aber vor allem für „Weißtöne“.

Auf die Schwächen der Normspektralwertfunktionen hinsichtlich der Diskrepanz zwischen visuellem und modelliertem Abgleich wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen hingewiesen [26] [27] [34] [54] [55]. Die neuen Spektralwertfunktionen CIE2006 von Stockmann aus der technischen Empfehlung CIE170 1:2006 wurden bisher nur in wenigen Studien untersucht.

Eine Untersuchung der Leistungsfähigkeit der von Stockmann definierten Spektralwertfunktionen wurde 2007 durch Bieske und Csuti [32] durchgeführt. Auch durch Schanda und Csuti wurden sowohl die verbesserte Modellierung durch die CIE2006 Funktionen, als auch die weiterhin vorhandene Diskrepanz zwischen dem visuellen Abgleich und dem über die CIE2006 berechneten Farbkoordinaten bestätigt [54].

Ein weiteres Problem in der Farbwahrnehmung sind die Toleranzgrenzen bei den Farbunterschieden. Die CIE wies in einem technischen Report [56] darauf hin, dass bei der Beurteilung von Farbunterschieden die Umgebung eine wesentliche Rolle spielt. Abhängig vom Sehfeld können sich Form und Ausrichtung der Ellipse ändern [23] [37]. So verwendete MacAdam ein 2°-Beobachterfeld und führte seine Tests mit nur einem Lichtspektrum durch. Des Weiteren arbeitete MacAdam in seinen Untersuchungen [4] nur mit einer Testperson. Folgeuntersuchungen durch Wyszecki [35] konnten die Toleranzgrenzen verbessern, allerdings basieren die Ergebnisse auf einer interpersonellen Betrachtung der Toleranzen. Es besteht also nach wie vor das Problem, dass trotz eines Abgleiches zwei Testpersonen nicht den gleichen Farbeindruck wahrnehmen.

---

## 1.3 Ziele der Arbeit

---

Im Rahmen dieser Arbeit werden über einen visuellen Farbabgleich unterschiedlicher Lichtquellen die inter- und intrapersonellen Streuungen von Testpersonen bestimmt. Ziel ist es zu überprüfen, in wie weit die Farborte von den visuell abgeglichenen Lichtquellen auseinanderliegen, wie stark die Unterschiede bei der Wahrnehmung des Farbeindrucks sind und inwiefern der Abstand durch die Verwendung von verschiedenen Spektralwertfunktionen beeinflusst wird. Dabei wird zwischen drei Wahrnehmungsstufen unterschieden:

- Gerade wahrnehmbarer Farbunterschied: Die Testperson meint gerade einen Farbtonunterschied zwischen den weißen Flächen wahrzunehmen.
- Gerade tolerierbarer Farbunterschied: Die Testperson kann einen farblichen Unterschied erkennen, erkennt aber noch an, dass die Referenz- und Vergleichslichtquelle noch gerade akzeptabel ähnlich erscheinen.
- Nicht mehr tolerierbarer Farbunterschied: Die Testperson nimmt einen farblichen Unterschied wahr, der die beiden Flächen unakzeptabel unterschiedlich erscheinen lässt.

Es wird untersucht, ob bei einem direkten Vergleich von unterschiedlichen Lichtquellen eine allgemeine Tendenz zu erkennen ist. In Abhängigkeit vom Lichtspektrum werden Bereiche definiert, in denen möglichst viele Beobachter auf einer weißen Fläche den gleichen Farbeindruck wahrnehmen.

Des Weiteren wird die bisherige Berechnungsmethode zur Bestimmung der Farborte in Frage gestellt. Es werden alternative Spektralwertfunktionen analysiert, die zu einer besseren Übereinstimmung zwischen dem visuellen und instrumentellen Abgleich unterschiedlicher Lichtquellen als die Normspektralwertfunktionen führen sollen.

Die bisherigen Berechnungen gehen von einem statischen Zusammenhang aus, d.h. alle Lichtspektren werden mit den gleichen Normspektralwertfunktionen bewertet. Dies ist mit den konventionellen Überlegungen der Tristimuli begründet, die darauf ausgelegt sind, sich ändernde Farbunterschiede zu bewerten. Es wird die These aufgestellt, dass die bekannten Spektralwertfunktion und Normspektralwertfunktionen das zu bewertende Lichtspektrum nicht ausreichend genau kalkuliert, was bei unterschiedlichen Lichtquellen mit unterschiedlichem Lichtspektrum trotz einem instrumentellen Abgleich zu einem wahrnehmbaren Farbunterschied führt.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es alternative Spektralwertfunktionen zu finden, die den instrumentellen und visuellen Abgleich aufeinander abstimmen. Hierzu wird die Beurteilung des visuellen Abgleiches in Abhängigkeit vom Lichtspektrum analysiert. Dazu ist wichtig herauszufinden, wie stark die individuelle Wahrnehmung vom Lichtspektrum abhängt. Zum einen wurde hierfür die inter- und intrapersonelle Streuung nach einem visuellen Abgleich von zwei Lichtquellen untersucht. Des Weiteren ist der Farbunterschied von zwei Lichtspektren nach einem visuellen Abgleich von Interesse. Ist die farbliche Änderung für alle Beobachter tendenziell gleich? Gibt es farbliche Unterschiede für verschiedene abzugleichende Lichtspektren und wie verhalten sich diese Änderungen für alle Vergleiche?

---

Basierend auf den Erkenntnissen der Messergebnisse können Aussagen darüber getroffen werden, in wie weit eine Anpassung möglich ist und an welchen Rechenschritten angesetzt werden kann, um eine Verbesserung der visuellen Gleichheit zu erlangen. Im Rahmen dieser Arbeit wird in Betracht gezogen, dass unterschiedliche Farbtemperaturen mit unterschiedlichen Normspektralwertfunktionen bewertet werden müssen.

Unter realen Bedingungen ist es schwierig den gesamten farblichen Eindruck einer Szene zu erfassen. Zahlreiche Faktoren beeinflussen dabei die Farbwahrnehmung. Der Farbreiz durch eine einzelne Lichtquelle ist dabei eher selten. Wesentliche Faktoren, die die Ergebnisse beeinflussen sind Alter und Tagesform der Versuchsperson. Auch spielen genetische Abweichungen eine wesentliche Rolle. Für die praktische Anwendung wäre es unvorteilhaft den Farbtort für jede Testperson mit den individuellen Spektralwertfunktionen zu bestimmen. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist, die Toleranzen für eine Anzahl an ausgewählten Versuchspersonen zu bestimmen, um so einen Bereich im Farbraum zu erhalten, in dem alle Versuchspersonen denselben Farbeindruck von einer Lichtquelle wahrnehmen. Hierzu werden die Toleranzen mittels der intrapersonellen Streuung bewertet, um den Bereich weiter einzuschränken, in dem die verschiedenen Personen einen Farbreiz erfahren.

---

## 2 Grundlagen

Zum späteren Verständnis geht das folgende Kapitel auf einige Grundlagen und Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Wahrnehmung, der Farbmeterik und der Statistik ein, welche für die Auswertung der Ergebnisse verwendet werden.

---

### 2.1 Das visuelle System des Menschen

---

Die Wahrnehmung ist der Prozess der Informationsgewinnung und -verarbeitung von verschiedenen Reizen, die aus der direkten Umgebung aufgenommen und an das Gehirn weitergeleitet werden. Durch das Zusammenfügen der Teilinformationen entsteht ein subjektiver Gesamteindruck. Grundsätzlich wird zwischen der Wahrnehmung der Außenwelt (Extrozeption) und der Wahrnehmung des eigenen Körpers unterschieden (Interzeption). Bei der Extrozeption bezieht man sich in der Regel auf die fünf Sinnesreize (Riechen, Sehen, Hören, Schmecken und Fühlen). Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Funktionsweise des menschlichen Sehapparates gegeben werden.

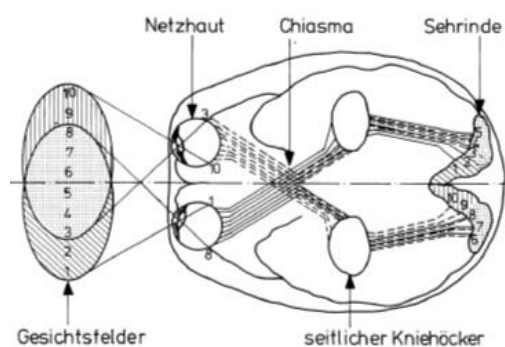


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau des menschlichen Sehsystems [42].

Abbildung 2 zeigt, wie visuelle Informationen vom menschlichen Sehapparat aufgenommen werden. Objekte im Gesichtsfeld werden von den Augen aufgenommen und auf deren Netzhaut abgebildet. Dabei sind die Sichtfelder des linken und des rechten Auges leicht verschoben, so dass sie sich überschneiden und somit eine räumliche Wahrnehmung ermöglichen.

Auf der Netzhaut werden die wahrgenommenen Informationen in Aktionspotentiale umgewandelt und ins Gehirn weitergeleitet. Im Chiasma opticum (Sehnervengabelung) kreuzen sich die nasalen Fasern, während die temporalen Fasern ungekreuzt bleiben. Somit werden etwa 90 % der Sehnerven zur Sehrinde über den seitlichen Kniehöcker geleitet.

Die Augen sind sehr empfindliche Sinnesorgane, welche zum Schutz eingebettet in einem Muskel-, Fett- und Bindegewebsspolster in den knöchernen Augenhöhlen des Schädels liegen. Die Augenlider sorgen für einen zusätzlichen Schutz vor äußeren Einflüssen. Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt des menschlichen Augapfels.



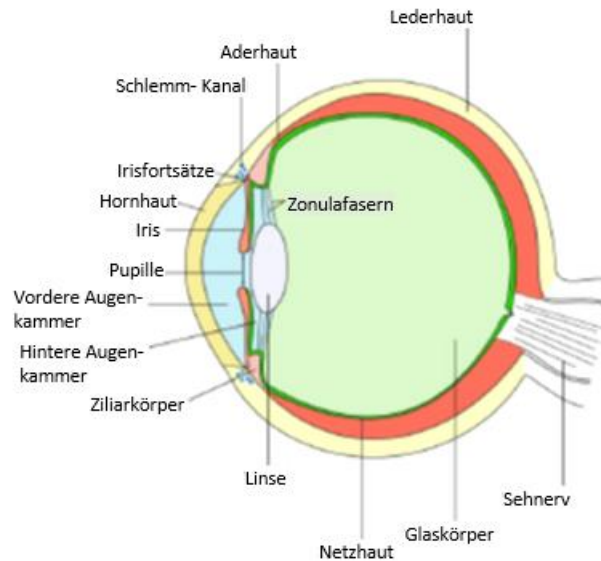


Abbildung 3: Aufbau des Auges [59].

Das Sehorgan kann in drei Untereinheiten gegliedert werden:

- den Augapfel,
- die Anhangsorgane des Auges,
- die Sehbahn.

Der Augapfel ist kugelförmig und besitzt ein optisches System, das aus Hornhaut, Linse, Glaskörper und Kammerwasser besteht. Die Hülle setzt sich aus drei Schichten zusammen, der Lederhaut, der Aderhaut und der Netzhaut, wobei letztere ebenfalls einen Teil der Sehbahn bildet.

Zu den Anhangsorganen des Auges gehören der Tränenapparat, die Augenmuskeln, die Bindehaut und die Augenlider [42]. Der Tränenapparat dient der Reinigung und dem Schutz des vorderen Augenabschnittes. Die Bindehaut, eine Schleimhaut im vorderen Augenabschnitt, verteilt bei jedem Lidschlag die Tränenflüssigkeit über der Hornhaut. Die Augenmuskeln, die in gerade und schräge Augenmuskeln unterteilt sind, dienen dazu, das Auge in die unterschiedlichsten Richtungen zu ziehen und damit das Blickfeld anzupassen. Das Augenlid ist eine dünne, aus Muskeln, Bindegewebe und Haut bestehende Falte, die das Auge zum Schutz vor Fremdkörpern und anderen äußeren Einflüssen vollständig bedecken kann.

Als Sehbahn bezeichnet man die neuronalen Verschaltungen des optischen Systems, die die aufgenommenen visuellen Reize vom Auge bis zum Gehirn weiterleiten. Hierzu zählen z.B. die Netzhaut im Auge und der Sehnerv. Die Netzhaut (Retina) bildet den Anfang der Sehbahn. Auf der Retina befinden sich lichtempfindlichen Rezeptoren, die in farbempfindliche Rezeptoren (Zapfen) und helligkeitsempfindliche Rezeptoren (Stäbchen) unterteilt werden können. Die wellenlängenabhängige Verteilung der Rezeptoren ist in Abbildung 4 dargestellt.



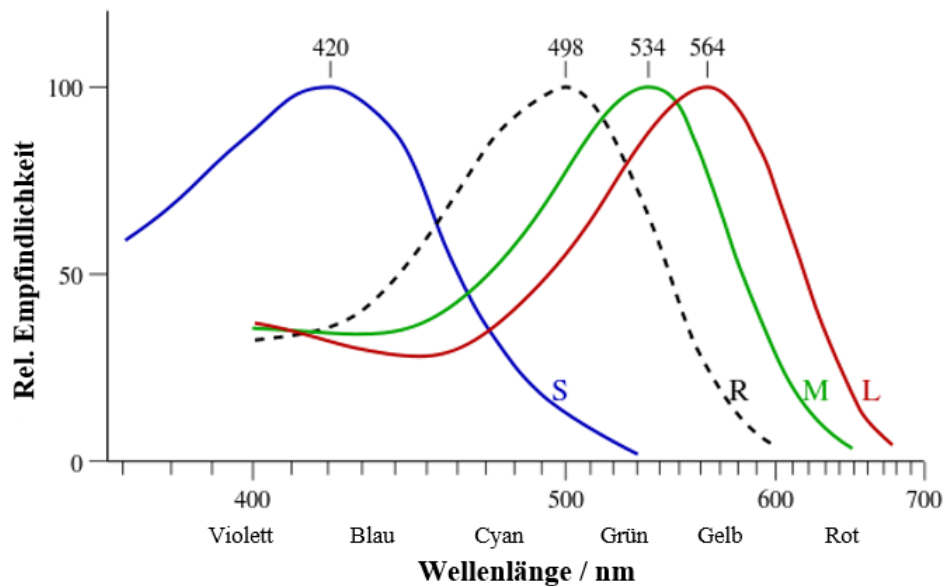


Abbildung 4: Spektrale Empfindlichkeitsverteilung der Zapfen (Rot, Grün und Blau) und Stäbchen (schwarz gestrichelt) [60].

Die Stäbchen ermöglichen das Sehen bei geringer Helligkeit, womit sie hauptsächlich für die visuelle Rezeption bei Dämmerung oder Nacht geeignet sind. Im Gegensatz zu den Zapfen weisen alle Stäbchen dasselbe Empfindlichkeitsspektrum auf und können daher keine Farben unterscheiden. Bei den Zapfen dagegen handelt es sich um Fotorezeptoren, wobei man zwischen dem S-Typ (Blaurezeptor), M-Typ (Grünrezeptor) und L-Typ (Rotrezeptor) unterscheidet. Ihre Reizantwort beschreibt die spektrale Absorptionskurve, welche die Grundlage der Farbmeterik bildet. Die Verteilung der Zapfen und Stäbchen ist in Abbildung 5 dargestellt.

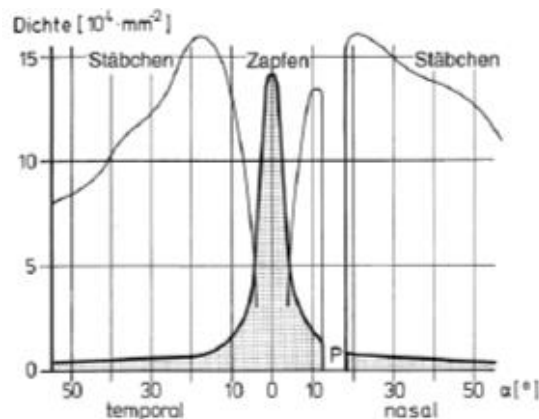


Abbildung 5: Dichteverteilung der Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut. Der Bereich um die Papille ist frei von Rezeptoren [42].

Im Außenbereich der Netzhaut überwiegt die Anzahl der Stäbchen, welche dem Menschen das Sehen bei Dämmerung ermöglichen. Die Zapfen sind im zentralen Bereichen der Netzhaut konzentriert.

---

## 2.2 Die Ishihara Farbtafeln

---

Menschen nehmen ihre Umgebung unterschiedlich wahr. Es existieren zahlreiche Faktoren welche die individuelle Wahrnehmung einer Szenerie beeinflussen können. So können der Blickwinkel und die Objektform, aber auch Tagesform und Alter die Wahrnehmung verändern. Neben Einflüssen durch die Umgebung spielt der Genotyp eine wesentliche Rolle [73] [74] [75]. Die in den Genen festgelegten Erbinformationen bilden in ihrer Gesamtheit den Genotyp. Der Genotyp ist der wichtigste Faktor dafür, wie sich ein Organismus entwickelt, wie er aussieht und welche biologischen Eigenschaften er haben wird, so auch unter anderem wie wir Farben wahrnehmen.

Ein normalsichtiger Mensch verfügt über die in Kapitel 2.1 beschriebenen drei Zapfentypen: S-Zapfen für kurzwelliges Licht, M-Zapfen für mittelwelliges Licht und L-Zapfen für langwelliges Licht. Bei einigen Menschen, kann es allerdings sein, dass einer dieser Zapfentypen beschädigt ist oder völlig fehlt. Von einer Rot-Grün-Sehschwäche (*Protanomalie-Deuteroanomalie*) sind etwa 8–9 % aller Männer und etwa 0,5–0,8 % der Frauen in westlichen Ländern betroffen. Die Blau-Gelb-Sehschwäche (*Tritanomalie*) ist dagegen sehr selten (weniger als 1 unter 10.000) [73] [74] [75]. Um eine Farbfehlsichtigkeit festzustellen werden häufig die Ishihara-Farbtafeln herangezogen. Benannt wurden diese Tafeln nach dem japanischen Augenarzt Shinobu Ishihara [72]. Der Test wird mit einem Bild durchgeführt, auf welchem runde Farbflecken in unterschiedlichen Farbtönen und Größen abgebildet sind (Abbildung 6).

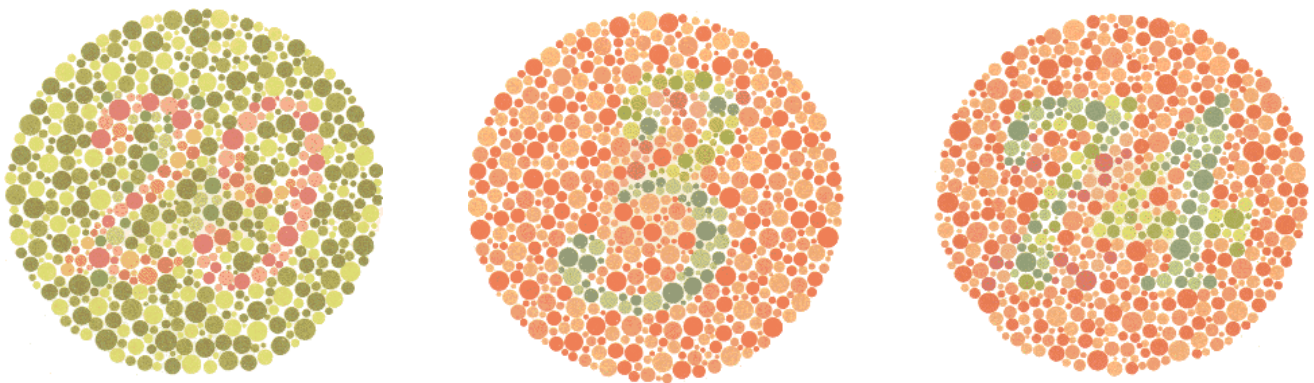


Abbildung 6: Ishihara-Farbtafeln zur Diagnose von Störungen einer Farbschwäche (<http://www.colour-blindness.com/>). Farbtüchtige Personen sehen die Zahlen 29 (Links), 3 (Mitte) und 74 (Rechts).

Personen mit normaler Farbsehfähigkeit können Zahlen oder Buchstaben erkennen, während Probanden mit einer Farbsehschwäche nichts erkennen können oder zumindest Schwierigkeiten haben. Um den Grad der Farbsehschwäche abzuschätzen zu können müssen mehrere Farbtafeln bewertet werden. Eine gering ausgeprägte Rot-Grün-Sehschwäche fällt im Alltag praktisch nicht auf. Die Betroffenen werden erst bei der Betrachtung der Ishihara-Tafeln mit dieser Art von Schwäche konfrontiert.

---

## 2.3 Farbmeterik

---

Die Farbmeterik behandelt die objektive Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge von wahrgenommenen Farben. Eine wichtige Komponente zur Beschreibung des farblichen Eindrucks von Lichtquellen sind die Normspektralwertfunktionen wie sie von der CIE im Jahre 1931 festgelegt wurden. Die Grundlage für die Normspektralwertfunktionen bilden zwei unabhängig durchgeführte Untersuchungen von Guild (1931) und Wright (1928-29) zur Bestimmung der Normfarbwertanteile von einer Reihe von Testpersonen.

Ausgehend von den Graßmannschen Gesetzen wurde von Guild und Wright ein Normalbeobachter festgelegt [39] [42]. In ihren Experimenten wurde eine Reihe von Testpersonen gebeten zwei Felder farblich aufeinander abzugleichen. Dabei konnte über drei Lichtquellen, deren Farbeindruck den drei Primärvalenzen entsprach, der Farbeindruck des Testfeldes auf die Farbe des Vergleichsfeldes visuell angepasst aufeinander werden (Abbildung 7).

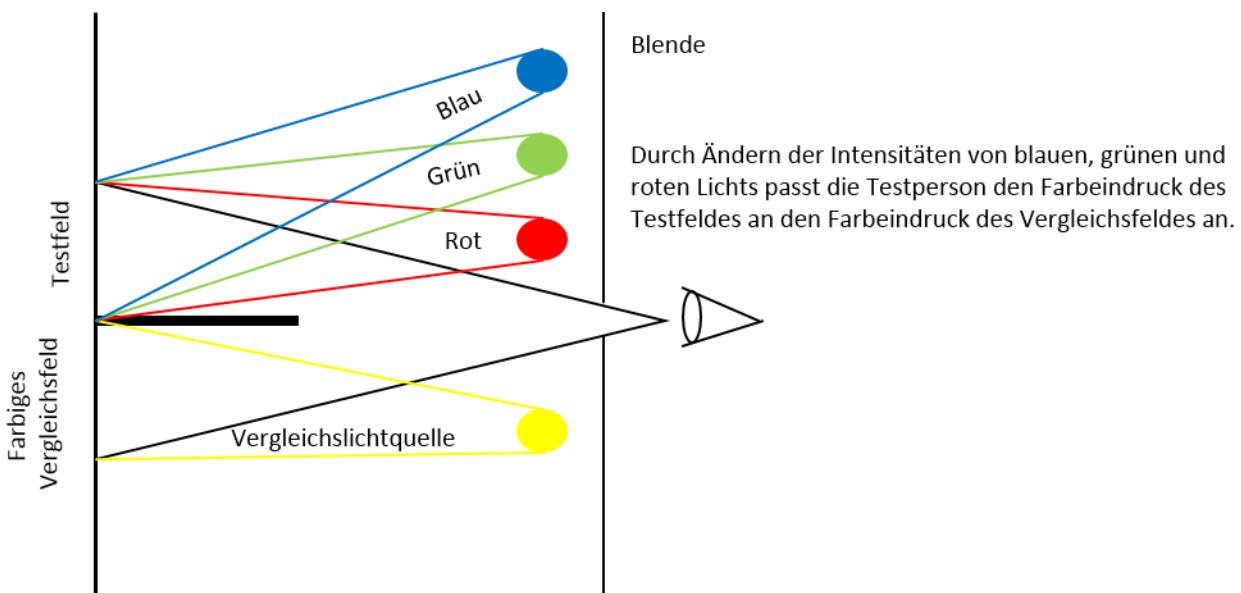


Abbildung 7: Prinzipieller Testaufbau von Guild und Wright.

Die Normfarbwertanteile liefern eine Aussage über das Mischverhältnis von den drei Primärvalenzen, nicht aber über spektrale Verteilung. Aus diesem Grund rekonstruierte die CIE aus den Ergebnissen von Wright und Guild die Normspektralwertfunktionen. Aus der Farbmischung ergaben sich die RGB Anteile für die jeweiligen Wellenlängen [38]. Für jede Wellenlänge wurden die Mischverhältnisse der drei Grundfarben in einem Diagramm zusammengefasst (Abbildung 8).

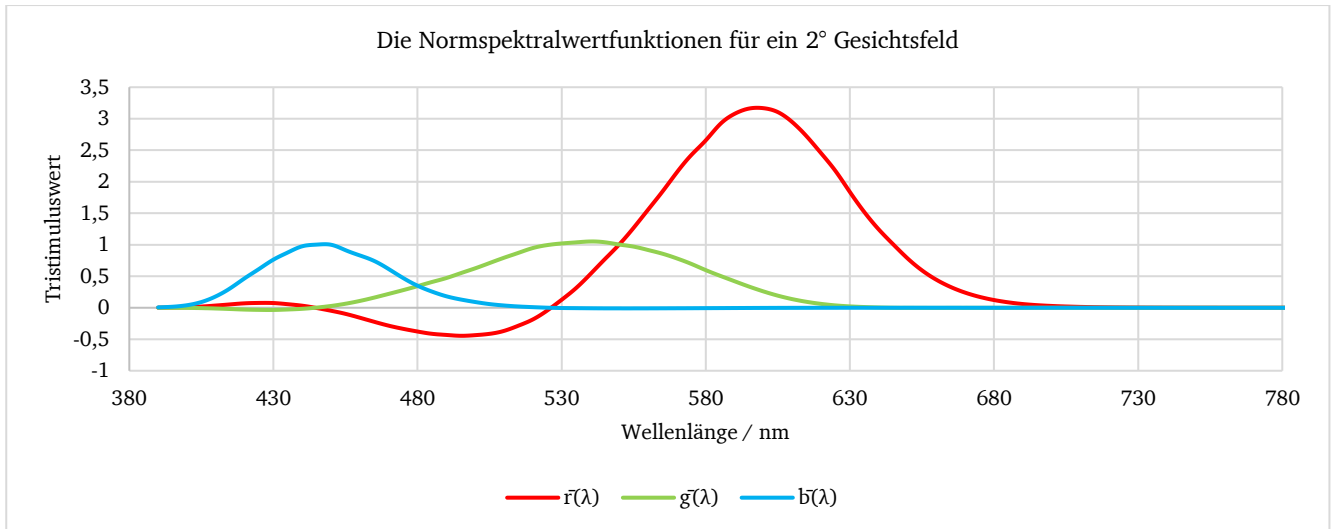


Abbildung 8:  $\bar{r}(\lambda)$ -,  $\bar{g}(\lambda)$ -,  $\bar{b}(\lambda)$ - Normspektralwertfunktionen für den 2° Normalbeobachter. Individuell können sich diese unterscheiden [61].

Da bei den Versuchen für einige Referenzen keine farbliche Übereinstimmung gefunden werden konnte, wurde für den Abgleich zusätzliches Licht von einer der Primärvalenzen zur Referenzseite hinzugemischt, was durch die negativen Anteile in Abbildung 8 dargestellt wird. Um einen Standardbeobachter zu definieren, mussten die Leuchtdichte und die spektrale Zusammensetzung der Primärvalenzen festgelegt werden. Die CIE legte drei monochromatische Wellenlängen fest: für Rot 700 nm, für Grün 546,1 nm und für Blau 435,8 nm.

Für Rot würde eine Leuchtdichte von 1 cd/m<sup>2</sup> für Grün 4,5907 cd/m<sup>2</sup>, und für Blau 0,0601 cd/m<sup>2</sup> gewählt. Aus praktischen Gründen wurde damals mit relativen Größen gerechnet. Die Normspektralwertfunktionen sind vom Blickfeld abhängig. In den Normen sind die Spektralwertfunktionen für ein 2° und ein 10° Gesichtsfeld angegeben.

Der colormetrische Umgang mit dem negativen Anteil der  $\bar{r}(\lambda)$ - Kurve gestaltete sich als schwierig. Um den negativen Anteil aus den Normspektralwertfunktionen zu eliminieren wurden die RGB Stimuli in die „imaginären“ Primärvalenzen XYZ umgewandelt [38]. So entstanden 1931 die  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ -,  $\bar{z}(\lambda)$ - Normspektralwertfunktionen für den Standardbeobachter (Abbildung 9) für ein 2° Gesichtsfeld und später im Jahre 1964 für ein 10° Gesichtsfeld, welche auf den  $\bar{r}(\lambda)$ -,  $\bar{g}(\lambda)$ -,  $\bar{b}(\lambda)$ - Kurven basieren.

Dabei wurde angenommen, dass die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion von 1924  $V(\lambda)$  eine der drei Normspektralwertfunktionen sein sollte [39].

Wenn man die  $\bar{x}(\lambda)$  (Rot und Blauanteile),  $\bar{y}(\lambda)$  (Grünanteil) und  $\bar{z}(\lambda)$  (Blauanteil)-Funktionen mit den  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktionen vergleicht, fallen Unterschiede sowohl in der Amplitude als auch in ihrer Form auf. Die 10° Kurven haben im blauen und roten Bereich höhere Amplituden als die 2° Kurven. Außerdem sind die 10° Kurven etwas breiter und decken somit ein breiteres Wellenlängenspektrum ab, was sich auf die Berechnung des Farbunterschiedes auswirkt.

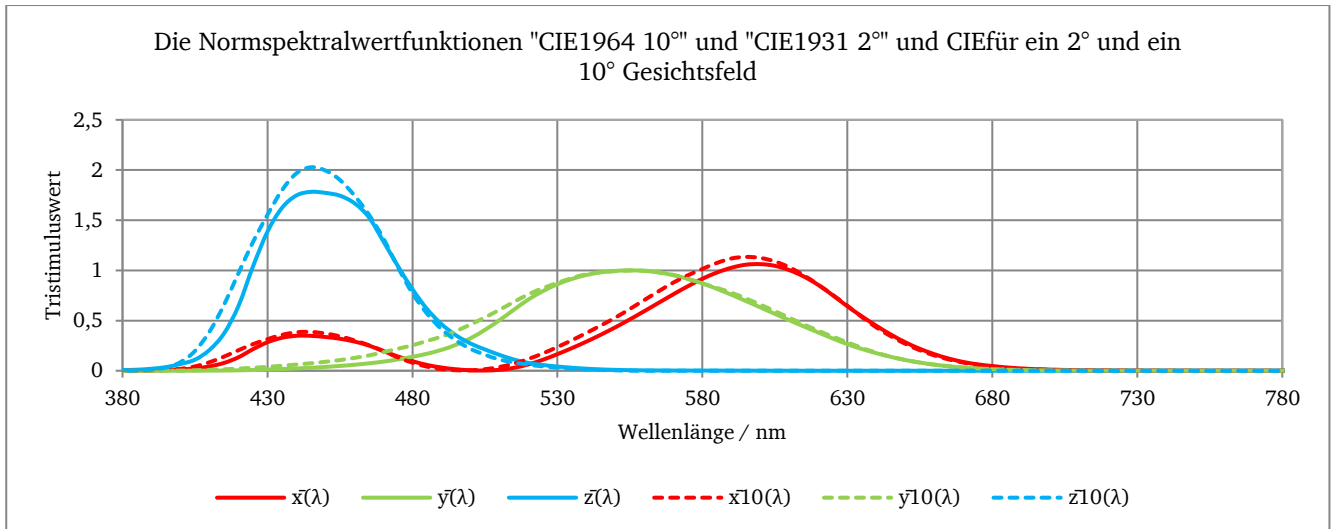


Abbildung 9: Normspektralwertfunktionen für ein 2° Gesichtsfeld (durchgezogene Linien) und für ein 10° Gesichtsfeld (gestrichelte Linien). Die Funktionen repräsentieren einen Standardbeobachter. Sie können für den jeweiligen Betrachter individuell verschieden sein. [49]

Es gab in der Vergangenheit bereits Ansätze die Normspektralwertfunktionen zu verbessern, um die Rezeptorempfindlichkeit besser zu beschreiben. Dennoch sind die Funktionen aus den Jahren 1931 und 1964 heute immer noch die Grundlage für viele Farbmessgeräte und Berechnungen [39].

Die Vorgehensweise der CIE bei der Rekonstruktion der Normspektralwertfunktionen wurde lange in Frage gestellt. Zweifel bestand dabei hinsichtlich der Zulässigkeit der linearen Anpassung der Funktionen an die  $V(\lambda)$ -Kurve und Abweichungen zwischen den wahrgenommenen und den gemessenen Farbdifferenzen. Des Weiteren bestand ein wachsendes Interesse an der Frage, ob die Normspektralwertfunktionen, die für ein 2°-Gesichtsfeld ausgelegt waren, auch für größere Gesichtsfelder geeignet sein könnten.

Im Jahr 1959 wurden erneut Untersuchungen von Stiles und Burch (et al.) durchgeführt mit dem Ziel die Normspektralwertfunktionen neu zu bestimmen [39]. Ähnlich den Versuchen von Guild und Wright wurden in einer Reihe von physiologischen Tests die individuellen Empfindlichkeiten der Farbrezeptoren mehrerer Versuchspersonen bestimmt. Anders als bei Guild und Wright sind die Spektralwertfunktionen von Stiles et al. nicht rekonstruiert. Die individuellen  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ -,  $\bar{z}(\lambda)$ - Kurven sind für ein 10° Gesichtsfeld in Abbildung 10 dargestellt.

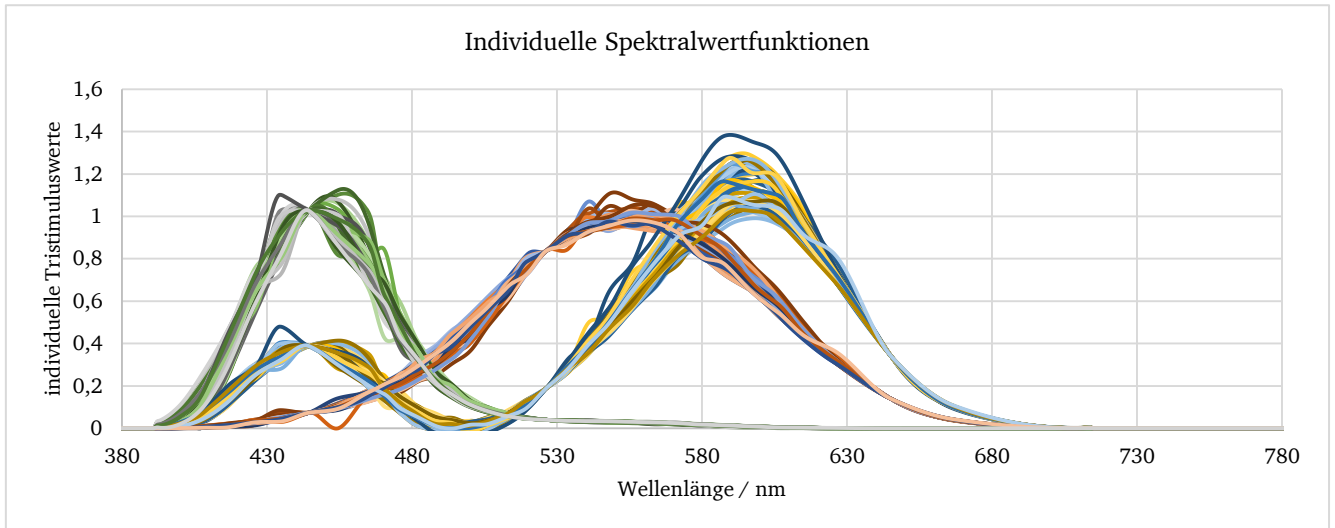


Abbildung 10: Individuell aufgenommene Kurven verschiedener Beobachter für ein 10° Gesichtsfeld. Sie unterscheiden sich sowohl in ihrer Amplitude als auch in ihrer Wellenlänge von dem Standardbeobachter [62].

Bei einem Vergleich der Normspektralwertfunktionen (Abbildung 9) mit den individuell bestimmten Kurven (Abbildung 10) kann man erkennen, inwiefern die Funktionen den Farbstand beeinflussen könnten. Verglichen mit den Standardfunktionen zeigen die individuellen Kurven einen ungleichmäßigeren Verlauf und sind entlang der Wellenlänge leicht verschoben.

Die Verschiebung entlang der Wellenlänge fällt vor allem im blauen Bereich an den Peaks auf [55], ein Hinweis auf die unterschiedlichen Genotypen. Außerdem variiert die Amplitude der  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ -,  $\bar{z}(\lambda)$ - Kurven, was auf eine unterschiedliche chromatische Adaptation der Testpersonen zurückzuführen ist. Abbildung 11 verdeutlicht am Beispiel der  $\bar{x}(\lambda)$ - Kurven den Einfluss der chromatischen Adaptation. Zu sehen ist das Verhältnis der individuellen spektralen Empfindlichkeitskurven  $\bar{x}(\lambda)_{\text{individuell}}$  zum Mittelwert der Empfindlichkeiten  $\bar{x}(\lambda)_{\text{mittel}}$ .

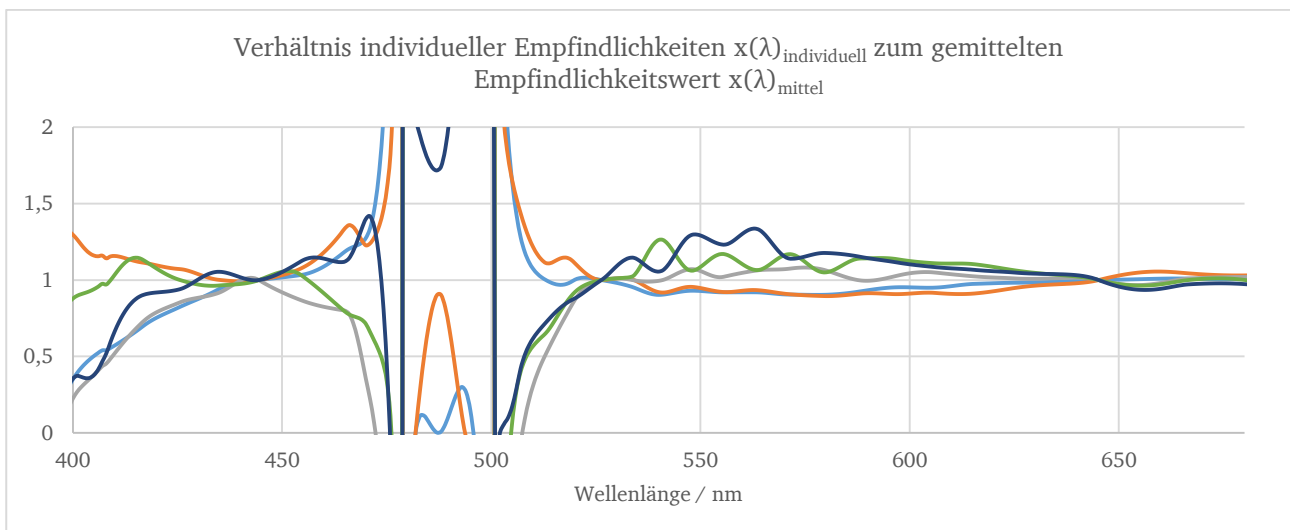


Abbildung 11: Das Verhältnis der individuellen Empfindlichkeitsfunktionen  $\bar{x}(\lambda)_{\text{individuell}}$  ausgewählter Versuchspersonen zum Mittelwert der Empfindlichkeitskurven  $\bar{x}(\lambda)_{\text{mittel}}$  weist in den Bereichen von 400 nm bis 480 nm bzw. von 500 nm bis 680 nm Schwankungen zwischen  $\pm 20\%$  auf.

---

In der Abbildung ist der Blauanteil (400 nm bis 480 nm) bzw. der Rotanteil (500 nm bis 680 nm) der  $\bar{x}(\lambda)$ -Kurve von besonderem Interesse. Im Rotbereich sind Schwankungen von  $\pm 20\%$  vorhanden. Im Blaubereich liegen die Schwankungen im mittleren Bereich (420 nm bis 460 nm) ebenfalls zwischen  $\pm 20\%$ , aber je weiter die Kurve abfällt, desto mehr nehmen die Abweichungen zu. Der starke Anstieg der Verhältnisswerte in den Bereichen 400 nm bis 420 nm bzw. 460 nm bis 500 nm hängt mit dem relativ starken Unterschied zwischen dem Mittelwert und den individuellen Kurven zusammen. Während der Mittelwert in diesen Bereichen Werte um 0,001 annimmt, sind die Werte der individuellen Kurven um zwei Zehnerpotenzen größer, bzw. kleiner. Die Ergebnisse der  $\bar{y}(\lambda)$ -Kurve (Grünanteile) und  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurve (Blauanteile) sind vergleichbar mit denen der  $\bar{x}(\lambda)$ -Kurve. Für den Grünbereich liegen die Schwankungen zwischen  $-10\%$  und  $20\%$ , während sie für den Blaubereich zwischen  $-20\%$  und  $30\%$  liegen.

Die Untersuchungen von Stiles und Burch zielten auf den Farbabgleich von  $2^\circ$  und  $10^\circ$  Gesichtsfeldern ab. Die Ergebnisse aus deren Untersuchungen zeigten Unterschiede zu den rekonstruierten Normspektralwertfunktionen. Allerdings waren die Unterschiede nicht gravierend genug um eine Änderung der bereits etablierten CIE1931 Funktionen zu rechtfertigen. [39]. Die Normspektralwertfunktionen für das  $10^\circ$ - Gesichtsfeld (Abbildung 9), wie sie von der CIE beschrieben werden, basieren auf den Untersuchungen von Stiles und Burch [41].

Die Herangehensweise der CIE gründete sich aus der Forderung nach einer geeigneten Farbmatrik. Der 1931 definierte Standardbeobachter basierte nicht auf einem direkten, sondern auf einem psychophysikalischen Ansatz.

Wenn Licht auf das Auge trifft, wird durch die Wellenlänge des Lichts bestimmt, welche lichtempfindlichen Rezeptoren angeregt werden. Dabei wird der an den Rezeptoren ausgelöste Farb-reiz durch die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der Rezeptoren beschrieben. Diese sind nach den jeweiligen Fotorezeptortypen benannt, die in der Regel in drei Typen unterschieden werden: den L-Typ (rotempfindlich), den M-Typ (grünempfindlich) und den S-Typ (blauempfindlich), jeweils benannt nach deren jeweiligen lang-, mittel- oder kurzwelligen Wellenlängenabhängigkeiten  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven (Abbildung 12).



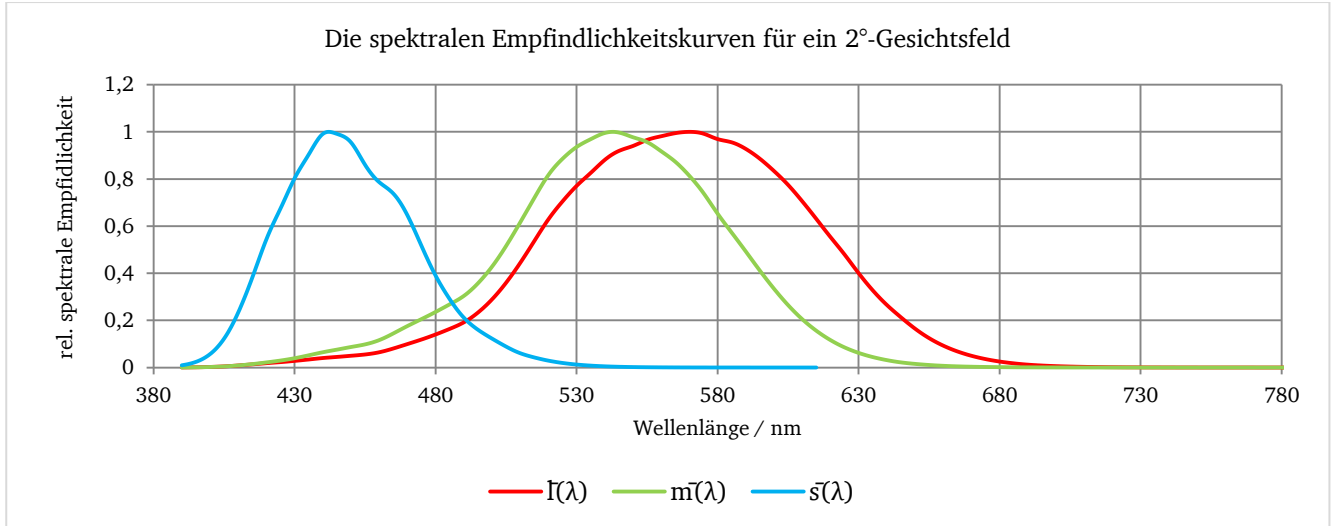


Abbildung 12: Zu sehen sind die spektralen Zapfenempfindlichkeiten  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ -,  $\bar{s}(\lambda)$  für das 2°- Gesichtsfeld (Stockman et al.). Die Kurven sind als eine Kombination der Spektralwertfunktionen von Stiles und Burch definiert [29][62].

In einer umfangreichen Untersuchung konnten Stockman et al. die spektralen Empfindlichkeiten der  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ - Kurven bestimmen [38], [39]. Basierend auf den Ergebnissen von Stiles und Burch reichten Stockmann et al. neue Spektralwertfunktionen „Stockmann 2°“ für das 2°- und „Stockmann 10°“ für das 10°-Gesichtsfeld ein (Abbildung 13).

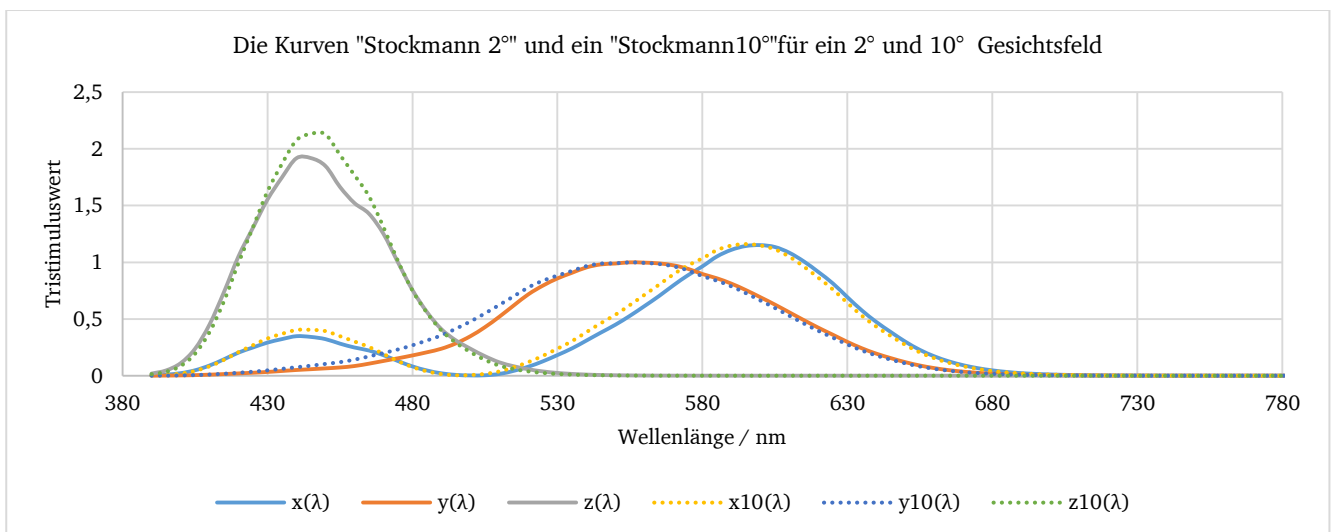


Abbildung 13: Die von Stockmann et. al. empfohlenen Normfarbwertfunktionen für ein 2°- Gesichtsfeld (durchgezogene Linien) und für ein 10°- Gesichtsfeld (gestrichelte Linien). Stockmann hatte für den spektralen Absorptionsgrad der Zapfenpigmente deren Maxima bei 420,7 nm, 530,3 nm und 558,9 nm ermittelt [30].

### 2.3.1 Einfluss der Feldgröße auf die Spektralwertfunktionen

Ursprünglich war von der CIE für die Berechnung der Farborte nur ein 2° Gesichtsfeld vorgesehen [45]. In der praktischen Anwendung ist das Sichtfeld allerdings in der Regel größer. Deswegen wurden zusätzlich die Spektralwertfunktionen für ein 10° Feld ermittelt.

Die Anpassung wird dabei auf die Dichteverteilung  $D_{\tau, \max}$  der Zapfen des menschlichen Sehapparats zurückgeführt. Dabei besteht zwischen der Größe des Sichtfeldes  $f_s$  und der Dich-



teverteilung der Zapfen  $D_{\tau, \max}$  ein exponentieller Zusammenhang. In den Standards werden für die drei Zapfenarten die folgenden Formeln empfohlen [45]:

$$D_{\tau, \max(\text{L-Zapfen})} = 0,38 + 0,54 \cdot e^{\left(-\frac{f_s}{1,333}\right)} \quad (1)$$

$$D_{\tau, \max(\text{M-Zapfen})} = 0,38 + 0,54 \cdot e^{\left(-\frac{f_s}{1,333}\right)} \quad (2)$$

$$D_{\tau, \max(\text{S-Zapfen})} = 0,30 + 0,45 \cdot e^{\left(-\frac{f_s}{1,333}\right)} \quad (3)$$

In Abbildung 14 sind die Dichtefunktionen der LMS- Zapfen als Funktion des Sichtfeldes  $f_s$  in Grad aufgetragen.

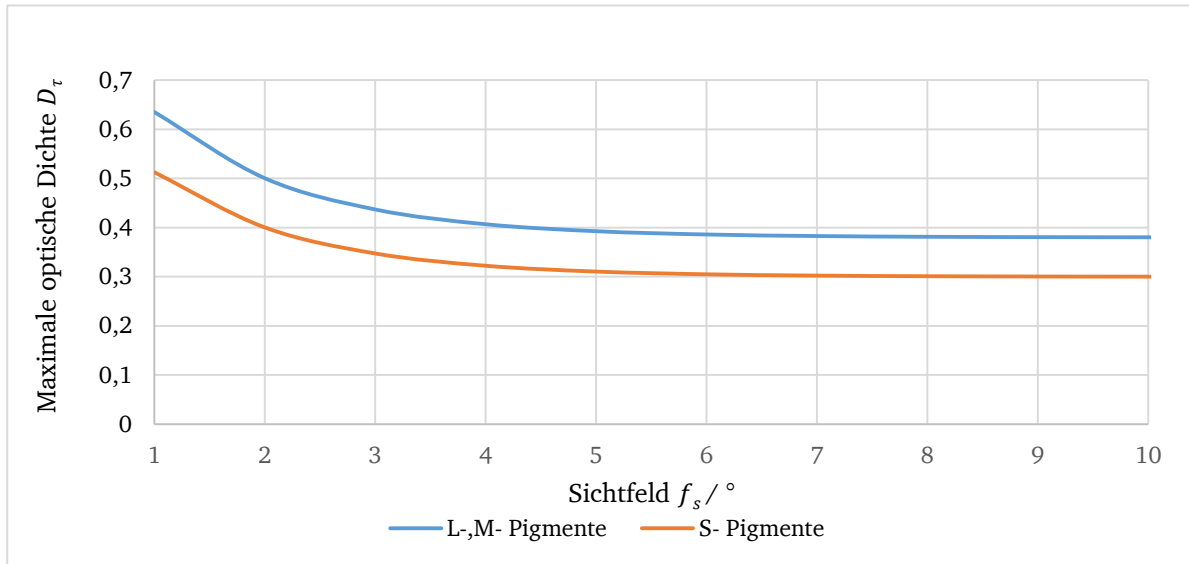


Abbildung 14: Maximale optische Dichte der visuellen Pigmente aufgetragen über das Sichtfeld  $f_s$ . Dabei ist  $f_s$  der Durchmesser  $2\alpha$  in Grad ([45]).

Die Zapfendichte hat für ein Gesichtsfeld von  $1^\circ$  sein Maximum und nimmt mit größer werdenden Sichtfeld ab, bevor die Dichte ab einem Wert von etwa  $7^\circ$  konstant bleibt.

### 2.3.2 Metamerie

Der Effekt, wenn unterschiedliche Lichtquellen denselben Farbeindruck hervorrufen, bzw. wenn unterschiedliche Farben unter einer Bezugslichtquelle übereinstimmen, wird als Metamerie bezeichnet [42].

Metamerie kann mehrere Ursachen haben. Eine häufige Ursache für Metamerie ist die unterschiedliche spektrale Verteilung der verschiedenen Lichtquellen (Beleuchtungsmetamerie). Dabei kann es vorkommen, dass zwei Farben unter Lichtart A gleich erscheinen, aber unter Lichtart B unterschiedlich wahrgenommen werden. Ebenso können Farben unter einer bestimmten Beobachtergeometrie, etwa dem  $2^\circ$ -Normalbeobachter übereinstimmen, sich aber für die Geometrie des  $10^\circ$ -Normalbeobachter unterscheiden, was durch die ungleichmäßige Vertei-

---

lung der Zapfen und Stäbchen im Auge verursacht wird. Die ungleichmäßige Verteilung der Zapfen und Stäbchen ist auch dafür verantwortlich, dass die Metamerie auch zwischen den individuellen Beobachtern unterschiedlich ist.

Metamerie spielt vor allem bei Körperfarben und Oberflächen eine große Rolle, da diese einen breiten Anteil des auftreffenden Lichtspektrums reflektieren. Die unterschiedlichen Farbeindrücke können mit Hilfe des Metamerie-Indexes beschrieben werden, wobei der Farbeindruck unter Tageslicht oder einer tageslichtähnlichen Lichtquelle als Referenz genommen wird.

Bei dem Metamerie-Index wird der Farbabstand  $\Delta E$  zwischen den Farborten der zu vergleichenden Lichtquellen oder Farbproben in einem gegebenen Farbraum, z.B. CIE  $L^*a^*b^*$ , verwendet (siehe auch Abschnitt 2.3.6 bzw. 2.3.8). Dabei werden Proben, die ein  $\Delta E$  von weniger als 0,5 aufweisen als abgeglichen angesehen.

### 2.3.3 Chromatische Adaptation

Ein Objekt kann unter verschiedenen Lichtbedingungen betrachtet werden, wie zum Beispiel unter Einfall von Sonnenlicht, Kerzenschein oder bei Glühlampenbeleuchtung [42]. Die menschliche Wahrnehmung erkennt in sämtlichen Fällen für das Objekt dieselbe Farbe. Diese Eigenschaft des visuellen Systems bezeichnet man als chromatische Adaptation. Eine Kamera andererseits würde unter verschiedenen Lichtquellen andere Farben registrieren. In einer Kamera wird die Korrektur als Weißabgleich bezeichnet.

Die Transformation der visuellen Wahrnehmungen kann mit Hilfe der chromatischen von Kries Adaptationsmethode vorgenommen werden [39]. Dabei handelt es sich um eine Technik, die darauf abzielt die Zapfenempfindlichkeit des menschlichen Sehapparates zu beschreiben. Der Ansatz von von Kries liefert eine gute Annäherung, wenn auch keine hundertprozentige Übereinstimmung, so dass es zwischen den unterschiedlichen Sehbedingungen zu farblichen Abweichungen kommen kann [39].

Bei der chromatischen Adaptation versuchen sich die Zapfentypen unabhängig voneinander an eine Beleuchtungssituation anzupassen. So sind z.B. die S-Zapfen bei Tageslicht weniger empfindlich, während bei Kerzenschein die L-Zapfen weniger aktiv sind.

### 2.3.4 MacAdam Ellipsen

Die CIE- Normfarbtafel wird häufig für die graphische Darstellung von Farbreizen verwendet. In der Praxis ist es allerdings notwendig, auch die Differenzierbarkeit von Farbreizen zeigen zu können. David MacAdam entwickelte mit seinen Untersuchungen die nach ihm benannten MacAdam-Ellipsen, welche die Bereiche im CIE-Normvalenzsystem beschreiben, in welchen einem Bezugsfarbton herum Vergleichsfarben als gleichabständig wahrgenommen werden [78]. Größe und Form der Ellipsoide sind abhängig vom Farbreiz, bzw. vom Bereich der Farbtafel (Abbildung 15)

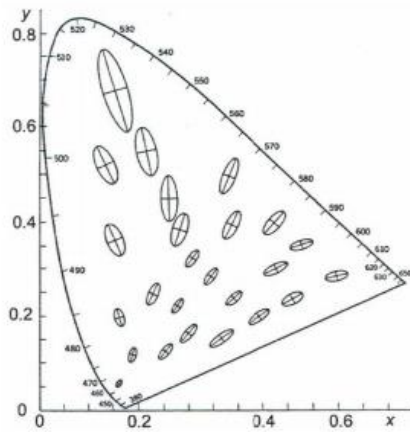


Abbildung 15: Ellipsoide in zehnfacher Vergrößerung (Schanda,2007). Für grüne Farben sind die Bereiche für wahrgenommene Gleich-farbigkeit wesentlich größer als für rote und blaue Farben

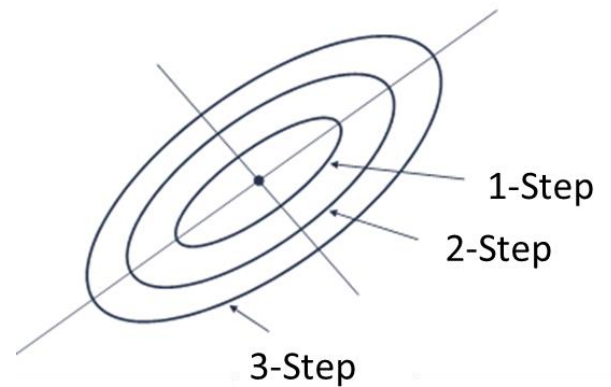


Abbildung 16: Bereiche für 1-Step, 2-Step und 3-Step MacAdam Ellipsen. Die ANSI empfiehlt beim LED Binning innerhalb der 4-Step Ellipsen zu bleiben [78]

Den Ellipsen sind „Steps“, bzw. auch als Standard Deviation Colour Matching (SDCM) zugeordnet worden, bei welchen es sich um Standardabweichungen handelt. Bei einer ausreichend großen Menge an Testpersonen und der Voraussetzung, dass jede Testperson bei jedem Farb- abgleich dasselbe sieht, können für die SDCM folgende Annahmen gemacht werden:

- Standardabweichung  $\pm 1\sigma$ : 68,3% der Population können einen Unterschied erkennen
- Standardabweichung  $\pm 2\sigma$ : 95,5% der Population können einen Unterschied erkennen
- Standardabweichung  $\pm 3\sigma$ : 99,7% der Population können einen Unterschied erkennen

Das bedeutet, dass z.B. für die 1-SDCM jeder beliebige Punkt innerhalb des Bereiches um den Mittelpunkt einer Standardabweichung des Mittelpunktes entspricht. Unter Verwendung der Standardabweichung und der in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Methode können die Ellipsen mit unterschiedlichen Größen ermittelt werden (Abbildung 16).

### 2.3.5 Tristimuli

Wenn Licht auf das Auge trifft, wird in Abhängigkeit von dem Verhältnis, in dem die Zapfen angeregt werden, ein bestimmter Farbeindruck erzeugt [42]. Das Verhältnis der Anregung ist in der CIE durch die Tristimulus Werte XYZ definiert [39]. Um den Farbeindruck einer Licht- quelle zu errechnen, wird deren spektrale Leistung  $I(\lambda)$  mit den Spektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  multipliziert, wie in den Formeln (4) bis (6) dargestellt.

$$X = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$Y = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$Z = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Die Tristimulus-Werte bilden die Grundlage des CIE1931 Normvalenzsystems, welches den Zusammenhang zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung und den physikalischen Farb-  
reizen beschreibt. Die Normierungskonstante  $k$  ist dabei für sekundäre Lichtquellen so ge-  
wählt, dass sich bei einer vollkommen weißen Oberfläche für  $Y$  der Wert 100 ergibt [42].

### 2.3.6 L\*a\*b\* Farbraum

Das CIE1931 Normvalenzsystem zeigt einige Mängel bei der empfindungsgerechten Darstel-  
lung der Farben [50]. Deswegen wurde 1976 das L\*a\*b\*-Farbsystem aus dem CIE1931 Far-  
braum mit der Intention weiterentwickelt, dass gleich empfundene Farbabstände in den ent-  
sprechenden euklidischen Abständen abgebildet werden.

Die Farben im L\*a\*b\*-Farbraum sind über die Koordinaten  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  definiert. Da-  
bei liegen die Farben Grün und Rot auf der  $a^*$ -Achse einander gegenüber, während die Farben  
Blau und Gelb auf der  $b^*$ -Achse liegen (Abbildung 17).

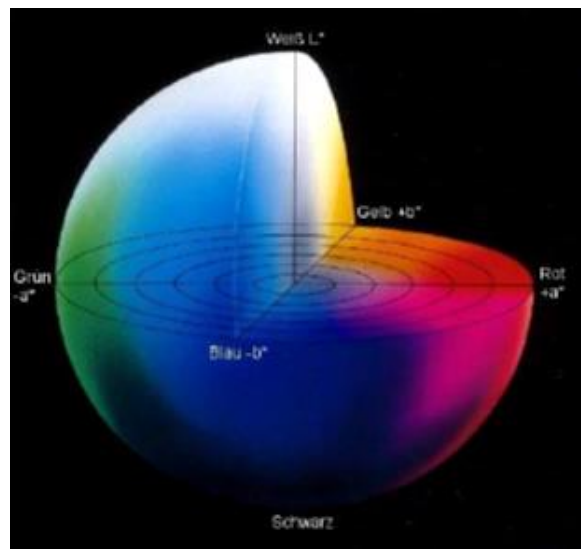


Abbildung 17: L\*a\*b\*- Farbraum in 3D Koordinaten. [42]

Die  $L^*$ -Achse liegt senkrecht zu den  $a^*$  und  $b^*$  Achsen und ist ein Maß für die Helligkeit. Die  
Berechnung der Koordinaten ist in den Formeln (7) bis (9) dargestellt.

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (7)$$

$$a^* = 500 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) \quad (8)$$

$$b^* = 200 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right) \quad (9)$$

Die  $X, Y, Z$  -Werte einer Lichtquelle werden auf die Referenzwerte einer Beleuchtungsart  $X_n, Y_n, Z_n$  bezogen. Bei den Normierungswerten handelt es sich standardgemäß um den Farbart des Weißpunktes entlang des Planckschen Strahlers und der Tageslichtphasen, welcher der Farbtemperatur der zu vergleichenden Lichtquelle entspricht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden als Bezugspunkte die Farborte von Lichtquellen bei den Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K verwendet.

### 2.3.7 DIN99-Farbraum

Auch wenn der  $L^*a^*b^*$ -Farbraum (Abschnitt 2.3.6) eine Verbesserung gegenüber dem CIE1931 Farbraum darstellt, so ist er für die praktische Anwendung nicht ausreichend gleichabständig. Dadurch wird die Beschreibung der Farbtoleranzen erst über eine komplexere Farbabstandsformel wie z.B. der CIEDE2000-Formel möglich [10]. Die CIEDE2000-Formel versucht die Farbabstandsbewertung des  $L^*a^*b^*$ -Modells zu verbessern, indem die Buntheits- und Buntton-Beiträge in der Farbabstandsformel berücksichtigt werden [67]. Diese Erweiterung bedeutet allerdings, dass der Farbabstand nicht mehr als vektorieller Abstand zwischen zwei Farborten definiert ist.

Anders als die Modifikation der Farbabstandsformel nach der CIEDE2000-Formel führt das DIN99 Modelle eine nichtlineare Transformation der CIELAB Farbmaßzahlen durch [8]. Dadurch wird ein neues System von Farbmaßzahlen definiert, in welchem die Farbabstände vektoriell beschreiben werden können [51].

Theoretisch liefert das Ergebnis einen Farbraum, dessen Gestalt im DIN99-Diagramm dem Ideal eines Zylinders nahekommt und somit in der verbesserten Übereinstimmung der Berechnungen mit wahrgenommenen Farbabständen resultiert [50]. Die Erweiterung der  $L^*a^*b^*$  Koordinaten in das DIN99 Modell ist in den Schritten (10) bis (12) dargestellt. Die Formel (10) zeigt dazu die Berechnung der Helligkeit  $L_{99}$  mit der Variable  $k_E$  als Maß für den Einfluss geänderter Betrachtungsbedingungen.

$$L_{99} = \left( \frac{1}{k_E} \right) \cdot 105,51 \cdot \ln(1 + 0,0158 \cdot L^*) \quad (10)$$

Die Berechnung der Bunttonwerte  $a_{99}$  und  $b_{99}$  erfolgt mittels der Formeln (11) und (12).

$$a_{99} = C_{99} \cdot \cos(h_{99}) \quad (11)$$

$$b_{99} = C_{99} \cdot \sin(h_{99}) \quad (12)$$

Die Hilfsgrößen e, f und G sind dabei über die Formeln (13) bis (17) gegeben.

$$e = a^* \cdot \cos(16^\circ) + b^* \cdot \sin(16^\circ) \quad (13)$$

$$f = 0,7 \cdot (-a^* \cdot \sin(16^\circ) + b^* \cdot \cos(16^\circ)) \quad (14)$$

$$G = \sqrt{(e^2 + f^2)} \quad (15)$$

$$C_{99} = \frac{\ln(1 + 0,045 \cdot G)}{0,045} \quad (16)$$

$$h_{99} = \arctan\left(\frac{f}{e}\right) \quad (17)$$

Zur Darstellung der Ergebnisse wird im Rahmen dieser Arbeit der DIN99 Farbraum verwendet [51], da er eine gute Näherung der CIEDE2000-Formel liefert und somit die visuelle Gleichabständigkeit gegenüber dem CIELAB-Raum verbessert. Es ist allerdings zu beachten, dass die Verbesserung der Gleichabständigkeit auf kleine Farbabstände beschränkt ist ( $\Delta E_{99} < 5$ ). Für größere Farbdifferenzen ist mit stärkeren Abweichungen zwischen der visuellen Bewertung und dem berechneten Farbabstand zu rechnen.

### Weiterentwicklung des DIN99-Farbraumes. DIN99b bis DIN99d

Der DIN99 Farbraum konnte die Gleichmäßigkeit der Farbdifferenzen zwar an die Ergebnisse der CIEDE2000-Formeln annähern, dennoch liefern die CIEDE2000-Formeln noch vergleichsweise bessere Ergebnisse. Über die Jahre wurden die DIN99-Formeln weiterentwickelt. So entstanden die DIN99b-, DIN99c- und DIN99d-Formeln, welche auf dem DIN99-Modell basieren. [67].

Das DIN99b-Modell (Formeln (18) bis (23)) war der erste Versuch die Original DIN99-Formeln zu verbessern. Die grundlegende Struktur wurde beibehalten. Lediglich die Koeffizienten haben sich geändert.

$$L_{99b} = \left(\frac{1}{k_E}\right) \cdot 303,67 \cdot \ln(1 + 0,0039 \cdot L^*) \quad (18)$$

$$e = a^* \cdot \cos(26^\circ) + b^* \cdot \sin(26^\circ) \quad (19)$$

$$f = 0,83 \cdot (-a^* \cdot \sin(26^\circ) + b^* \cdot \cos(26^\circ)) \quad (20)$$

$$G = \sqrt{(e^2 + f^2)} \quad (21)$$

$$C_{99b} = 23 \cdot \ln(1 + 0,075 \cdot G) \quad (22)$$

$$h_{99b} = \arctan \left( \frac{f}{e} \right) + 26^\circ \quad (23)$$

Um den Winkel für die Sättigung an das CIELAB-Modell anzupassen, wird eine Verschiebung von  $26^\circ$  berücksichtigt. Die Bunttonanteile  $a_{99b}$  und  $b_{99b}$  ergeben sich über die Formeln (24) und (25).

$$a_{99b} = C_{99b} \cdot \cos(h_{99b}) \quad (24)$$

$$b_{99b} = C_{99b} \cdot \sin(h_{99b}) \quad (25)$$

Cui et. al. haben in ihren Untersuchungen die DIN99b-, DIN99c- und DIN99d-Modellen mit dem ursprünglichen DIN99-Modell verglichen [66]. Er hat dabei festgestellt, dass das DIN99b-Modell bei der Berechnung Farbdifferenz generell eine Verbesserung gegenüber der DIN99 darstellt. Eine Ausnahme ist der Bereich der grauen Farben, in dem sich die beiden Modelle kaum unterscheiden und der Bereich der blauen Farben, in dem die Verwendung des DIN99b-Modells zu einer Verschlechterung führt.

Um die Darstellung im Blaubereich zu verbessern wurden die Modelle DIN99c und DIN99d entwickelt. Kuehni hatte festgestellt, dass eine Modifikation bei der Berechnung der Tristimuluswerte die Gleichmäßigkeit im Blaubereich verbessert [68]. Dabei wird bei der Berechnung von  $L^* a^* b^*$  (siehe Abschnitt 2.3.6) der  $X$ -Wert durch  $X'$  ersetzt. Die Größe  $X'$  wird über (26) berechnet.

$$X' = 1,1X - 0,1Z \quad (26)$$

Das DIN99c-Modell verwendet die Formeln (27) bis (34).

$$L_{99c} = \left( \frac{1}{k_E} \right) \cdot 317,65 \cdot \ln(1 + 0,0037 \cdot L^*) \quad (27)$$

$$e = a^* \quad (28)$$

$$f = 0,94 \cdot b^* \quad (29)$$

$$G = \sqrt{(e^2 + f^2)} \quad (30)$$

$$C_{99c} = 23 \cdot \ln(1 + 0,066 \cdot G) \quad (31)$$

$$h_{99b} = \arctan \left( \frac{f}{e} \right) \quad (32)$$

$$a_{99c} = C_{99c} \cdot \cos(h_{99c}) \quad (33)$$

$$b_{99c} = C_{99c} \cdot \sin(h_{99c}) \quad (34)$$

Das DIN99d-Modell verwendet die Formeln (35) bis (43).

$$X' = 1,12X - 0,12Z \quad (35)$$

$$L_{99} = \left(\frac{1}{k_E}\right) \cdot 325,22 \cdot \ln(1 + 0,0036 \cdot L^*) \quad (36)$$

$$e = a^* \cdot \cos(50^\circ) + b^* \cdot \sin(50^\circ) \quad (37)$$

$$f = 1,14 \cdot (-a^* \cdot \sin(50^\circ) + b^* \cdot \cos(50^\circ)) \quad (38)$$

$$G = \sqrt{(e^2 + f^2)} \quad (39)$$

$$C_{99c} = 22,5 \cdot \ln(1 + 0,06 \cdot G) \quad (40)$$

$$h_{99b} = \arctan\left(\frac{f}{e}\right) + 50^\circ \quad (41)$$

$$a_{99d} = C_{99d} \cdot \cos(h_{99d}) \quad (42)$$

$$b_{99d} = C_{99d} \cdot \sin(h_{99d}) \quad (43)$$

Gegenüber dem ursprünglichen DIN99-Modell und dem verbesserten DIN99b-Modell sind zusätzlich zu dem angepassten Tristimuluswert X noch die Koeffizienten geändert. Die Untersuchungen von Cui et.al. [66] bestätigen die Verbesserung im Blaubereich gegenüber dem DIN99b-Modell.

### 2.3.8 Berechnung des Farbabstandes $\Delta E_{99}$

Zur späteren Bestimmung des mittleren Farbabstandes werden die Einstellungen der individuellen Testperson spektral vermessen und entsprechend den Formel (4) bis (12) aus den vorherigen Kapiteln in  $a_i$  und  $b_i$  umgerechnet, wobei  $a_i$  und  $b_i$  den Farbmaßzahlen  $\Delta L_{99}$ ,  $a_{99}$  und  $b_{99}$  entsprechen. Der Farbabstand  $\Delta E_{99}$  kann dann über die Formel (44) berechnet werden:

$$\Delta E_{99} = \sqrt{(\Delta L_{99})^2 + (\Delta a_{99})^2 + (\Delta b_{99})^2} \quad (44)$$

In einem weiteren Schritt werden die Koordinaten  $a_o$  und  $b_o$  der jeweiligen Testpersonen gemäß den Formeln (45) und (46) gemittelt, wobei die Mittelung über den Überstrich gekennzeichnet ist.

$$\overline{a'}_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (45)$$



$$\bar{b}'_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \quad (46)$$

Dabei repräsentieren die Werte  $\bar{a}'_o$  und  $\bar{b}'_o$  die gemittelten Farbmaßzahlen einer Testperson. Die Gesamtzahl der von einer Testperson durchgeführten Versuche ist über den Wert  $n$  gegeben. Im Anschluss wird der Mittelwert aller Testpersonen über die Formeln (47) und (48) berechnet.

$$\bar{a}' = \frac{1}{p} \sum_{o=1}^p \bar{a}'_o \quad (47)$$

$$\bar{b}' = \frac{1}{p} \sum_{o=1}^p \bar{b}'_o \quad (48)$$

Die Werte  $\bar{a}'$  und  $\bar{b}'$  sind die gemittelten Farbmaßzahlen aller Testpersonen. Die Anzahl aller Testpersonen ist über den Wert  $p$  gegeben.

Der Farbabstand zwischen zwei Farbtönen wird normalerweise über  $\Delta E$  bzw. für DIN99 mit  $\Delta E_{99}$  (Formel (44)) angegeben. Der gemittelte Wert  $\Delta \bar{E}_{99}$  zwischen dem Farbort der Referenzquelle und den gemittelten Farbtönen der Testpersonen wird mit Formel (49) berechnet [64]:

$$\Delta \bar{E}_{99} = \sqrt{(\Delta \bar{L}_{99})^2 + (\Delta \bar{a}_{99})^2 + (\Delta \bar{b}_{99})^2} \quad (49)$$

Dabei berechnen sich  $\Delta \bar{L}_{99}$ ,  $\Delta \bar{a}_{99}$  und  $\Delta \bar{b}_{99}$  über (50) bis (52):

$$\Delta \bar{L}_{99} = L'_{\text{ref}} - \bar{L}' \quad (50)$$

$$\Delta \bar{a}_{99} = a'_{\text{ref}} - \bar{a}' \quad (51)$$

$$\Delta \bar{b}_{99} = b'_{\text{ref}} - \bar{b}' \quad (52)$$

Unter Verwendung der Farbtöne der Referenzquelle ( $L'_{\text{ref}}$ ,  $a'_{\text{ref}}$ ,  $b'_{\text{ref}}$ ) und den gemittelten Farbtönen der Testpersonen ( $\bar{L}'$ ,  $\bar{a}'$ ,  $\bar{b}'$ ) ergibt sich der Abstand zwischen dem Farbort der Referenzlichtquelle und den gemittelten Farbtönen der visuell abgeglichenen Testlichtquelle über die Formel (53):

$$\Delta \bar{E}_{99} = \sqrt{(L'_{\text{ref}} - \bar{L}')^2 + (a'_{\text{ref}} - \bar{a}')^2 + (b'_{\text{ref}} - \bar{b}')^2} \quad (53)$$

Für den Fall, dass sich die Referenzlichtquelle und die Vergleichslichtquelle auf derselben Helligkeit befinden, vereinfacht sich (53) zu:

$$\Delta \bar{E}_{99} = \sqrt{(a'_{\text{ref}} - \bar{a}')^2 + (b'_{\text{ref}} - \bar{b}')^2} \quad (54)$$

### 2.3.9 Alternativer Farbraum basierend auf den LMS-Zapfensignalen

Die  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ - und  $\bar{z}(\lambda)$ -Normspektralwertfunktionen basieren auf den  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ -,  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven, welche die physisch gemessene Empfindlichkeit des Auges wiedergeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird analysiert, ob die Verwendung der  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ -,  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven zu einer verbesserten Übereinstimmung zwischen visuellem und instrumentellem Abgleich führt.

Wie bei der Berechnung der in Abschnitt 2.3.5 beschriebenen Tristimuluswerte werden durch die Multiplikation des Lichtspektrums  $I(\lambda)$  bei der Wellenlänge  $\lambda$  mit den entsprechenden  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ -,  $\bar{s}(\lambda)$ -Empfindlichkeitskurven die LMS Zapfensignale bestimmt, wie in den Formeln (55) bis (57) angegeben.

$$L = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{l}(\lambda) d\lambda \quad (55)$$

$$M = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{m}(\lambda) d\lambda \quad (56)$$

$$S = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I(\lambda) \cdot \bar{s}(\lambda) d\lambda \quad (57)$$

Die gemittelten Koordinaten werden mit  $\bar{l}$ ,  $\bar{m}$  angegeben, welche über die Formeln (58) und (59) berechnet werden:

$$\bar{l} = \frac{L}{L + M + S} \quad (58)$$

$$\bar{m} = \frac{M}{L + M + S} \quad (59)$$

### 2.3.10 Farbwiedergabeindex

In der Beleuchtungstechnik ist die Auswirkung einer Lichtart auf die Farbempfindung beleuchteter Objekte durch die Farbwiedergebe beschrieben. Die Qualität der Farbwiedergabe einer Lichtquelle wird dabei über den Farbwiedergabeindex  $R_a$  angegeben.

Die Farbwiedergabe-Eigenschaften einer Lichtquelle beziehen sich stets auf eine Bezugslichtart. Es kann sich bei der Bezugslichtart dabei um eine tatsächlich vorhandene Lichtquelle handeln oder sie kann lediglich eine reine Rechengröße sein. In der Regel wird bis zu einer Farbtemperatur von 5000 K ein Lichtspektrum verwendet, welches vom schwarzen Strahler der

entsprechenden Farbtemperatur abgegeben wird. Bei Werten über 5000 K dient ein tageslicht-ähnlich verlaufendes Lichtspektrum als Referenz.

Der Farbwiedergabeindex ist nicht von der Farbtemperatur abhängig. Jede Lichtquelle, welche das Spektrum der Referenzlichtquelle bei der betrachteten Farbtemperatur perfekt nachbildet, wird mit einem Farbwiedergabeindex von 100 bewertet.

Zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex werden in DIN 6169 vierzehn Testfarben definiert, wobei allerdings nur die ersten acht zur Berechnung verwendet werden. Die Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die vierzehn Testfarben nach DIN6169 unter Verwendung eines Tageslichtspektrums.

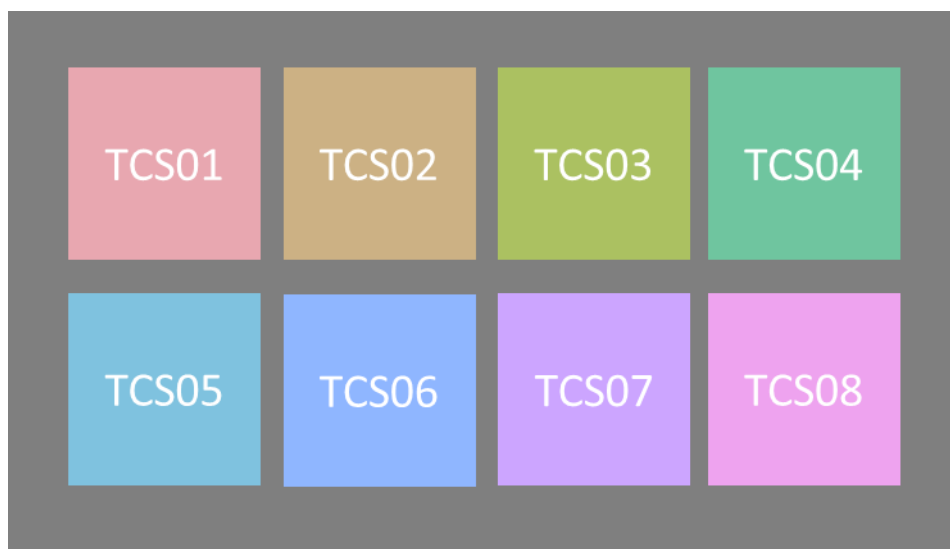


Abbildung 18: Die acht ungesättigten Testfarben nach DIN6169 unter Tageslicht [63]

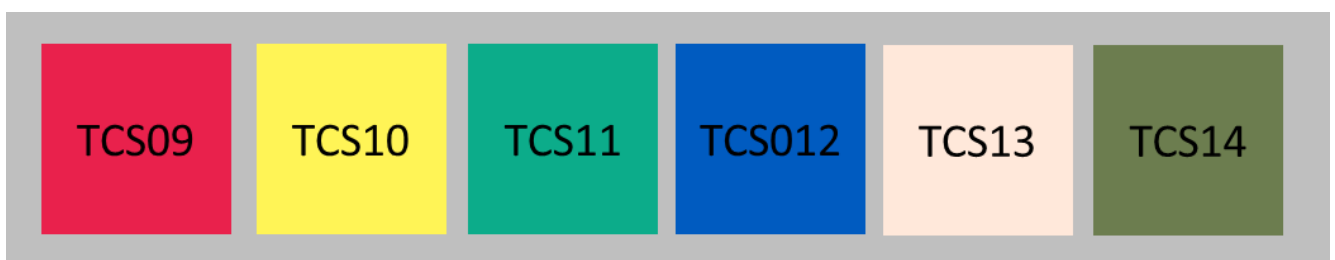


Abbildung 19: Die sechs zusätzlichen Farben nach DIN6169 unter Tageslicht [63]

Messtechnisch und rechnerisch wird die Verschiebung der Farbe über die folgenden in DIN6169 beschriebenen Schritte ermittelt [63]:

1. Bestimmung der Normfarbwerte der Testfarben für die entsprechenden Lichtquellen.
2. Umwandlung der ermittelten Normfarbwerte in die entsprechenden Farbwerte in einem empfindungsgemäßen System, z.B. der Farbraum CIE1964.
3. Bewertung des resultierenden Farbunterschiedes im empfindungsgemäßen System unter Verwendung des von der CIE1964 empfohlenen Farbabstandsformel zur Berechnung des Farbverschiebungswerts  $\Delta E_i$ .
4. Umwandlung der Farbverschiebungen in den Farbwiedergabeindex  $R_a$ .

Die Umrechnung der Normfarbwerte auf die  $uv$ -Koordinaten der UCS-Farbtabelle CIE1960 [65] geschieht über die Formeln (60) und (61) gegeben, wobei es sich bei den Werten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  um die in 2.3.5 beschriebenen Tristimuluswerte handelt:

$$u = \frac{4 \cdot X}{(X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z)} \quad (60)$$

$$v = \frac{6 \cdot X}{(X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z)} \quad (61)$$

Um die Farbwandlung zu berücksichtigen, die sich auf die unterschiedliche Farbstimmung zwischen der zu kennzeichnenden Lichtart  $k$  und der Bezugslichtart  $r$  bezieht, werden die folgenden Formeln angewendet [65]:

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - 4 \cdot \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r}{16,518 + 1,481 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r} \quad (62)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r} \quad (63)$$

Dabei sind  $u'_{k,i}$  und  $v'_{k,i}$  die Farbörter der Testfarbe  $i$  unter der Lichtart  $k$  nach Berücksichtigung der Farbwandlung wobei die Größen  $c$  und  $d$  über die folgenden Formeln gegeben sind:

$$c = \frac{1}{v}(4 - u - 10v) \quad (64)$$

$$d = \frac{1}{v}(1,708v + 0,404 - 1,481u) \quad (65)$$

Die Farbörter der Bezugslichtart werden über die folgenden Formeln in den Farbraum CIE 1964 umgerechnet:

$$W_{r,i}^* = 25 \cdot (Y_{r,i})^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (66)$$

$$U_{r,i}^* = 13 \cdot W_{r,i}^* \cdot (u_{r,i} - u_r) \quad (67)$$

$$V_{r,i}^* = 13 \cdot W_{r,i}^* \cdot (v_{r,i} - v_r) \quad (68)$$

Die Farbörter der zu kennzeichnenden Lichtart werden über die folgenden Formeln berechnet:

$$W_{k,i}^* = 25 \cdot (Y_{k,i})^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (69)$$

$$U_{k,i}^* = 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (u'_{k,i} - u'_k) \quad (70)$$

$$V_{k,i}^* = 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (v'_{k,i} - v'_k) \quad (71)$$

Für die Berechnung der Differenz zwischen der Farbempfindung einer Testfarbe  $i$  unter Verwendung der Lichtart  $k$  und bei Beleuchtung derselben Testfarbe unter der Referenzlichtart  $r$  wird die Farbabstandsformel CIE1964 verwendet [63]:

$$\Delta E_i = \left[ (U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (72)$$

Der spezielle Farbwiedergabeindex für die jeweiligen Testfarben wird über die Formel (73) bestimmt, wobei der Index  $i$  für eine der acht Testfarben steht, wie sie in DIN6169 beschrieben sind.

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (73)$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$  ist der arithmetische Mittelwert, der sich aus den speziellen Farbwiedergabeindizes  $R_i$  zusammensetzt (74).

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^R R_i \quad (74)$$

---

## 2.4 Analyse der Ergebnisse

---

Zur späteren Analyse werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit statistischen Kennwerten wie Schätzwerten und deren Streuung dargestellt. Für die in den Abschnitten 2.3.6 bis 2.3.9 beschriebenen Farbabständen werden deren inter- und intrapersonellen Mittelwerte und Standardabweichungen bzw. deren Konfidenzintervalle bestimmt. Die wahrnehmbaren Farbtoleranzen werden mit Hilfe von Kovarianzellipsen beschrieben.

### 2.4.1 Einstichproben t-Test [52]

Der t-Test wird eingesetzt, um den Mittelwert  $\bar{x}$  einer Stichprobe mit einem vorher bestimmten Zielwert  $\mu_0$  zu vergleichen [52]. Es kann z.B. die Nullhypothese, ob der Mittelwert einer Grundgesamtheit gleich einem vorgegebenen oder vordefinierten Wert ist ( $H_0: \mu = \mu_0$ ) gegen die Alternativhypothese geprüft werden, dass der Mittelwert der Grundgesamtheit  $n$  ungleich dem vorgegebenen Wert ist ( $H_1: \mu \neq \mu_0$ ).

Voraussetzung ist, dass der Zielwert bekannt oder definiert ist. Für kleine Probenumfänge ist die geschätzte Standardabweichung nicht genau genug. Deswegen geht man davon aus, dass der Mittelwert eine t-Verteilung hat und normalverteilt ist. Die verschiedenen Hypothesen und

Alternativhypothesen sowie die entsprechenden Ablehnungsbereiche sind zur Übersicht in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Hypothese, Alternativhypothese und Ablehnungsbereich für den Einstichprobentest [52].

Einstichproben t-Test			
	Rechtsseitig	Zweiseitig	Linksseitig
Hypothese	$H_0: \mu \leq \mu_0$	$H_0: \mu = \mu_0$	$H_0: \mu \geq \mu_0$
Alternativhypothese	$H_1: \mu > \mu_0$	$H_1: \mu \neq \mu_0$	$H_1: \mu < \mu_0$
Ablehnungsbereich	$t_{1-\alpha; n-1}, \infty$	$(-\infty; -t_{1-\alpha; n-1}) \cup t_{1-\alpha; n-1}, \infty$	$-\infty; -t_{1-\alpha; n-1}$

Die Größe  $\alpha$  steht für das Signifikanzniveau, zu dem die Nullhypothese abgelehnt oder angenommen wird. Die Ablehnungsbereiche werden über das Quantil der t-Verteilung definiert, wobei  $(n - 1)$  die Freiheitsgrade angeben. Die Tabelle mit den entsprechenden t-Quantilen ist in Anhang B angegeben.

Die Prüfgröße  $t$  wird über die Formeln (75) bis (77) berechnet.

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (75)$$

$$\text{Standardabweichung} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (76)$$

$$\text{Prüfwert} \quad t = \sqrt{n} \frac{\bar{x} - \mu_0}{s} \quad (77)$$

#### 2.4.2 Konfidenzintervalle [52]

Das Konfidenzintervall wird als ein Vertrauensintervall bezeichnet, das die Genauigkeit der Lageschätzung eines Parameters wie z.B. den Mittelwert einer Grundgesamtheit angibt. Es gibt den Bereich an, der bei einer unendlichen Anzahl von Wiederholungen eines Zufallsexperiments mit einer gewissen Häufigkeit, dem sogenannten Konfidenzniveau, die annähernd korrekte Lage des Parameters beinhaltet. Ein für ein vorgegebenes Konfidenzniveau breites Intervall ist ein Indiz für einen geringen Stichprobenumfang oder weist auf eine starke Variabilität in der Grundgesamtheit hin. Über die Gleichungen (75) bis (77) ergibt sich das Konfidenzintervall (78).

$$\left[ \bar{x} - t_{(1-\frac{\alpha}{2}; n-1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{(1-\frac{\alpha}{2}; n-1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (78)$$

### 2.4.3 Kovarianzellipsen [53]

Ergebnisse, die zufällig über eine mehrdimensionale Ebene verteilt sind, können vereinfacht in Form von Ellipsen beschrieben werden und ermöglichen eine aussagekräftige Darstellung multivarianter Verteilung. Die einzelnen Zwischenschritte zur Berechnung der Ellipse sind in den Formeln (79) bis (85) dargestellt. Die allgemeine Ellipsengleichung lautet:

$$1 = \frac{x_1^2}{p_1^2} + \frac{x_2^2}{p_2^2} \quad (79)$$

Dabei sind  $x_1$  und  $x_2$  die Abszisse und die Ordinate des kartesischen Koordinatensystems und  $p_1$  und  $p_2$  die beiden Hauptachsen der Ellipse. Die beiden Halbachsen lassen sich über die Formeln (80) und (81) wie folgt ausdrücken.

$$p_1^2 = (1 - \rho) \cdot \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\sigma_1^2} - \frac{2 \cdot \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} + \frac{\sin^2 \alpha}{\sigma_2^2} \right) \quad (80)$$

$$p_2^2 = (1 - \rho) \cdot \left( \frac{\sin^2 \alpha}{\sigma_1^2} - \frac{2 \cdot \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} + \frac{\cos^2 \alpha}{\sigma_2^2} \right) \quad (81)$$

Dabei steht der Parameter  $\rho$  für den Korrelationskoeffizienten, der sich aus der Korrelation der Parameter  $x_1$  und  $x_2$  sowie der Standardabweichung der Parameter  $x_1$  und  $x_2$  ergibt.

$$\rho = \frac{\text{cov}(x_1, x_2)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (82)$$

Die Drehung der Ellipse im kartesischen Koordinatensystem ist über den Rotationswinkel  $\alpha$  definiert.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\rho\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right) \quad (83)$$

Die Parametrisierung der Ellipse ist mit  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  über die Gleichungen (84) und (85) gegeben.

$$x_1(\varphi) = \left( \frac{\cos^2 \varphi}{p_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{p_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \varphi - \sin \alpha \cdot \sin \varphi) + a_1 \quad (84)$$

$$x_2(\varphi) = \left( \frac{\cos^2 \varphi}{p_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{p_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \varphi + \cos \alpha \cdot \sin \varphi) + a_2 \quad (85)$$

---

## 2.5 Leuchtmittel

---

Im Folgenden wird kurz auf die Technologie der in dieser Arbeit verwendeten Leuchtmittel eingegangen.

### 2.5.1 Halogenglühlampe - Glühlampe

Bei der Halogenglühlampe handelt es sich um eine Variante der Glühlampe [42]. Die typische Glühlampe besteht aus einem Sockel, einem Glühfaden, einem Glaskolben und einem Schutzgas. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung fließt Strom durch einen dünnen Wolframfaden und erhitzt diesen so stark, dass dieser anfängt, Strahlung im sichtbaren Bereich zu emittieren. Je nach Bauform kann die Temperatur des Glühfadens bis zu 3000 °C erreichen, so dass dessen Strahlung gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz emittiert wird, typischerweise Farbtemperaturen von 2300 K bis 2900 K. Im Gegensatz zu anderen künstlichen Lichtquellen besitzen Glühlampen ein kontinuierliches Spektrum, welches mit zunehmender Wellenlänge über den sichtbaren Bereich hinaus stetig ansteigt (Abbildung 20).

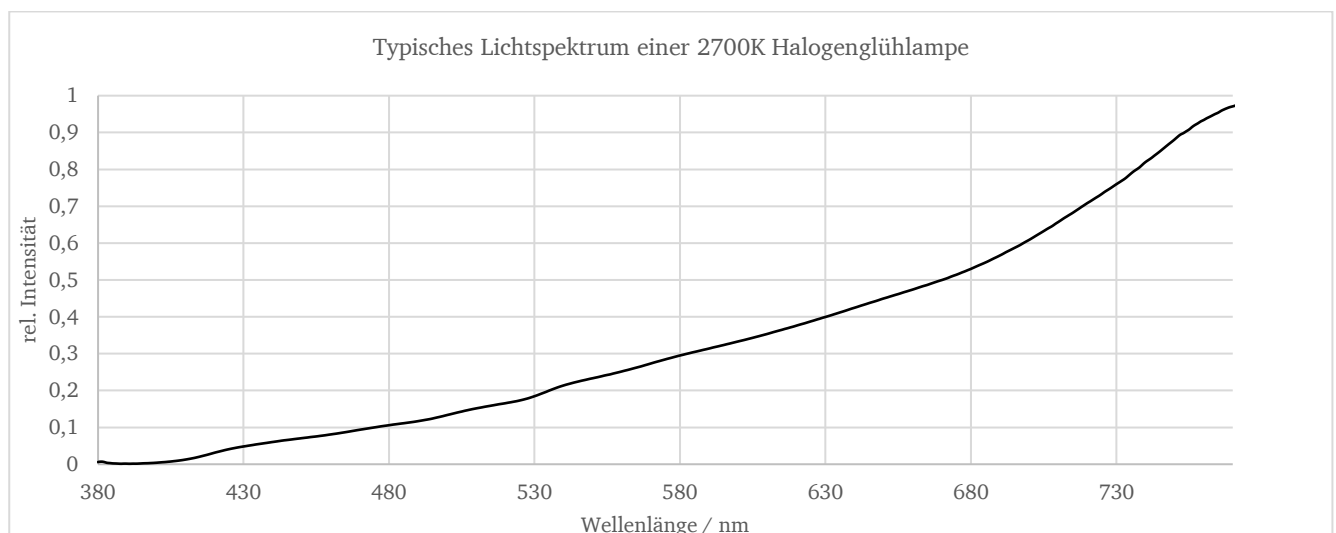


Abbildung 20: Das sichtbares Lichtspektrum einer Halogenglühlampe wie sie auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Unter normaler Umgebungsluft würde der Glühfaden aufgrund der hohen Betriebstemperaturen sofort zu Wolframoxid verbrennen. Um das Verbrennen des Wolframdrahtes durch zu hohe Temperaturen zu verhindern, ist der Glühfaden durch einen mit einem Schutzgas gefüllten Glaskolben von der Umgebung abgeschirmt. Bei der Halogenglühlampe handelt es sich um eine verbesserte Variante der Glühlampe. Dem Schutzgas im Kolben der Lampe werden Halogene (z.B. Iod) beigefügt, welche mit dem vom Glühdraht verdampften Wolfram reagieren. Bei hohen Temperaturen zerfällt die Verbindung zurück in ihre Elemente und die Wolframatome lagern sich wieder auf der Glühwendel ab. Dadurch ist es möglich, die Halogenglühlampen bei höheren Temperaturen als Glühlampen zu betreiben.



## 2.5.2 Kompaktleuchtstofflampe

Die Kompaktleuchtstofflampe ist eine Variante der Leuchtstofflampe [42]. Sie unterscheidet sich von der Leuchtstofflampe hauptsächlich durch ihren Aufbau. Es wird dabei zwischen Lampen mit und ohne integriertes Vorschaltgerät unterschieden.

Leuchtstofflampen bestehen aus einer gasgefüllten Glasröhre, an deren Enden sich Elektroden befinden. Die Innenseite dieser Röhren ist mit einem fluoreszierenden Leuchtstoff beschichtet. Durch das Anlegen einer Spannung wird das Gas angeregt und fängt an zu emittieren. Die dadurch entstehende Lichtfarbe ist dabei abhängig vom verwendeten Gas und Leuchtstoff. Typischerweise wird als Gasmischung Quecksilberdampf benutzt.

Durch die „Zündung“ wird das Gas elektrisch leitend und es bildet sich ein Niederdruckplasma, welches Licht ausstrahlt, wenn die Quecksilberatome von beschleunigten freien Elektronen angeregt werden, die schließlich wieder auf einen niedrigeren Energiezustand zurückfallen (Abbildung 21).

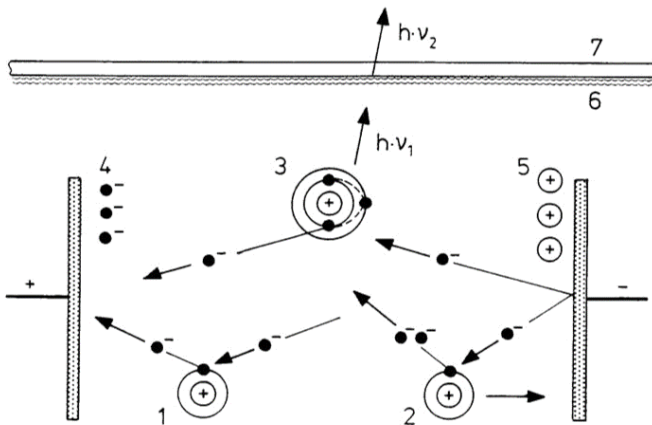


Abbildung 21: Entladungsstrecke [42].

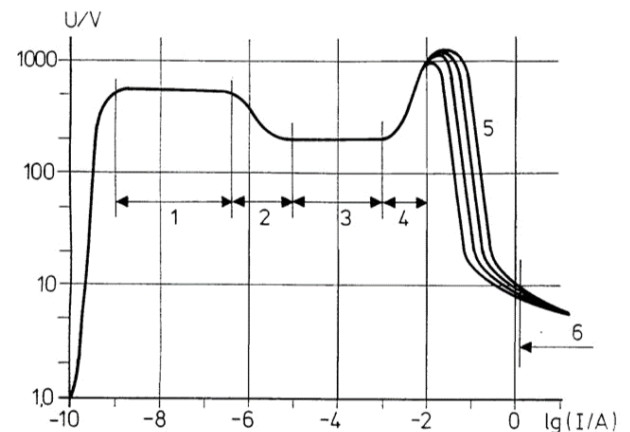


Abbildung 22: I/U Diagramm selbständiger Entladungen [42].

- |                     |                 |                       |                        |
|---------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| 1. Elastischer Stoß | 4,5. Raumladung | 1. Townsend-Entladung | 4. Anormale Entladung  |
| 2. Ionisierungsstoß | 6. Leuchtstoff  | 2. Übergangszone      | 5. Instabile Entladung |
| 3. Anregungsstoß    | 7. Glaskolben   | 3. Glimmentladung     | 6. Bogenentladung      |

Quecksilbergas emittiert überwiegend Ultraviolettstrahlung mit nur geringem Anteil an sichtbarem Licht. Durch die Verwendung einer Leuchtstoff-Beschichtung kann diese emittierte Strahlung in den sichtbaren Wellenlängenbereich konvertiert werden.

Im Gegensatz zu Halogenglühlampen besitzen Leuchtstofflampen kein kontinuierliches Spektrum. Abbildung 23 zeigt ein Leuchtstofflampenspektrum, wie es für diese Arbeit verwendet wird.

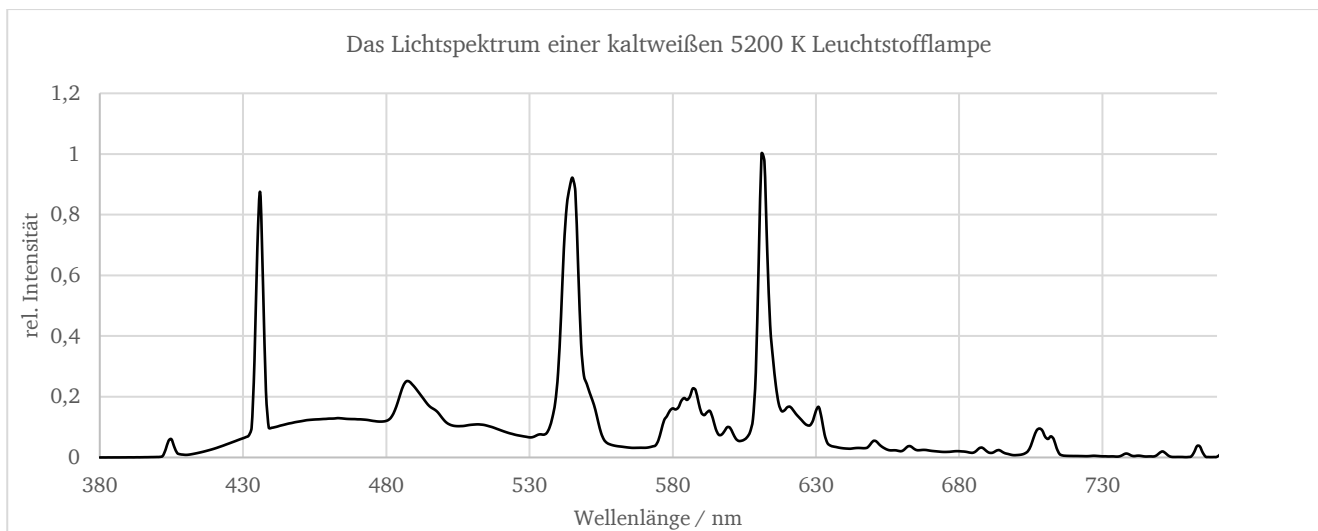


Abbildung 23: Das sichtbare Lichtspektrum einer 5200 K Leuchtstofflampe wie sie in dieser Arbeit verwendet wird.

Ein Nachteil von Leuchtstofflampen ist die Verzögerung beim Einschalten. So können je nach Modell und Hersteller Unterschiede von 15 Sekunden bis zu 5 Minuten auftreten, bis sie nach dem Einschalten ihre volle Leuchtkraft entfaltet haben und sich ihr Farbort stabilisiert hat.

### 2.5.3 Light Emitting Diode

Die LED (aus dem Englischen: Light Emitting Diode) ist ein lichtemittierendes Halbleiter-Bauelement mit den elektrischen Eigenschaften einer Diode [42]. Dabei wird die elektrische Leitfähigkeit unter anderem durch die Größe der Bandlücke, dem Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband bestimmt.

Die elektrischen Eigenschaften von Halbleitern werden durch das Einbringen von Fremdatomen in den Halbleiterkristall ermöglicht (Dotierung). Durch die Dotierung werden zusätzliche, örtlich gebundene Energieniveaus im Banddiagramm des Halbleiters erzeugt. Diese Niveaus liegen in der Regel zwischen Valenz- und Leitungsband. Durch die im Vergleich zu undotierten Halbleitern geringeren Energiedifferenzen der „Zwischenniveaus“ zum Valenz- beziehungsweise Leitungsband können diese Niveaus leichter angeregt werden. Es stehen daher mehr Ladungsträger für die Leitung des elektrischen Stroms zur Verfügung. Man unterscheidet bei den Störstellen zwischen Donatoren und Akzeptoren.

Donatoren sind Fremdatome mit zusätzlichen Elektronen (Elektronenüberschuss). Häufig verwendete Atome sind Phosphor und Arsen. Dabei handelt es sich um 5-wertige Atome mit einem Elektron mehr im Leitungsband. Man bezeichnet Gebiete mit einem Elektronenüberschuss auch als n-dotierte Halbleiter. Fremdatome, die ein Elektron weniger im Valenzband haben, werden dementsprechend als Akzeptoren bezeichnet (Elektronenmangel). Typischerweise werden 3-wertige Atome wie Gallium oder Indium verwendet, mit einem Elektron weniger im Valenzband. Man bezeichnet Gebiete mit einem Elektronenmangel als p-dotiert.

Wenn p-dotierte und n-dotierte Bereiche aneinander liegen, wandern die Elektronen des n-Kristalls in den p-Kristall und rekombinieren dort mit den Löchern (Diffusion). Ebenso „dif-

fundieren“ Löcher des p-Bereiches in den n-Bereich und rekombinieren dort mit freien Elektronen. Aufgrund von Diffusion und Rekombination fehlen auf beiden Seiten freie Ladungsträger und es bildet sich eine ladungsträgerfreie Zone. In dieser Zone wird durch die Anwesenheit der geladenen Atomrümpfe ein internes elektrisches Feld erzeugt, das eine Kraft auf die verbleibenden freien Ladungsträger ausübt. Die dadurch verursachte Driftbewegung ist der durch die Diffusion verursachten Bewegung der Elektronen entgegengerichtet. Es entsteht eine Raumladungszone (Abbildung 24 (a)).

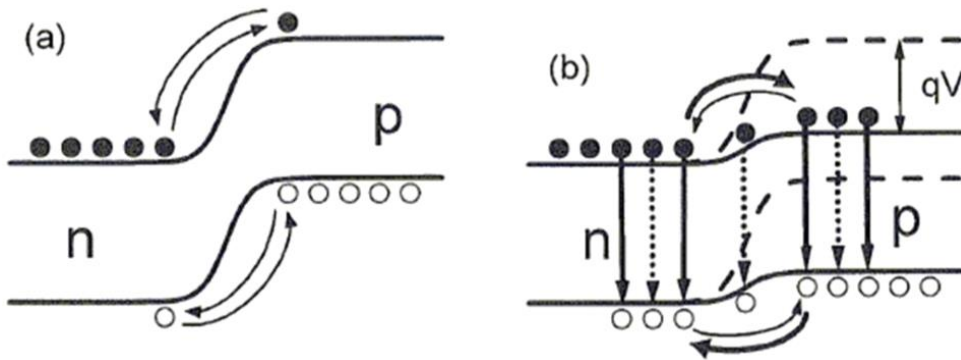


Abbildung 24: Bänderdiagramm eines p-n-Homoüberganges eines LED (Zukauskas, et al.,) [42].

Wenn eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt wird, verringert sich die der Bewegung entgegengesetzte Kraft. Durch das von außen angelegte elektrische Feld entsteht ein neues elektrisches Feld, das den Ladungstransport durch den Halbleiterkristall ermöglicht. Elektronen wandern von der n-dotierten Seite über den p-n-Übergang zur p-dotierten Seite. Im p-dotierten Bereich geht das Elektron in das energetisch günstigere Valenzband über. Die bei diesem Vorgang freiwerdende Energie wird als Licht wieder abgegeben. Dabei bestimmt die Bandlücke des verwendeten Materials die Wellenlänge des emittierten Lichtes (86).

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\varepsilon_{ph}} \quad (86)$$

Dabei steht  $\lambda$  für die emittierte Wellenlänge,  $h$  für die Planck-Konstante,  $c$  für die Lichtgeschwindigkeit und  $\varepsilon_{ph}$  für die Photonenenergie.

Damit ein Elektron vom Leitungsband in das Valenzband springen kann, sollte die Gitterschwingung der beiden Bänder übereinstimmen. Ist dies der Fall, liegt das Minimum des Leitungsbandes über dem Maximum des Valenzbandes. Man spricht von einem direkten Bandübergang (Abbildung 25).

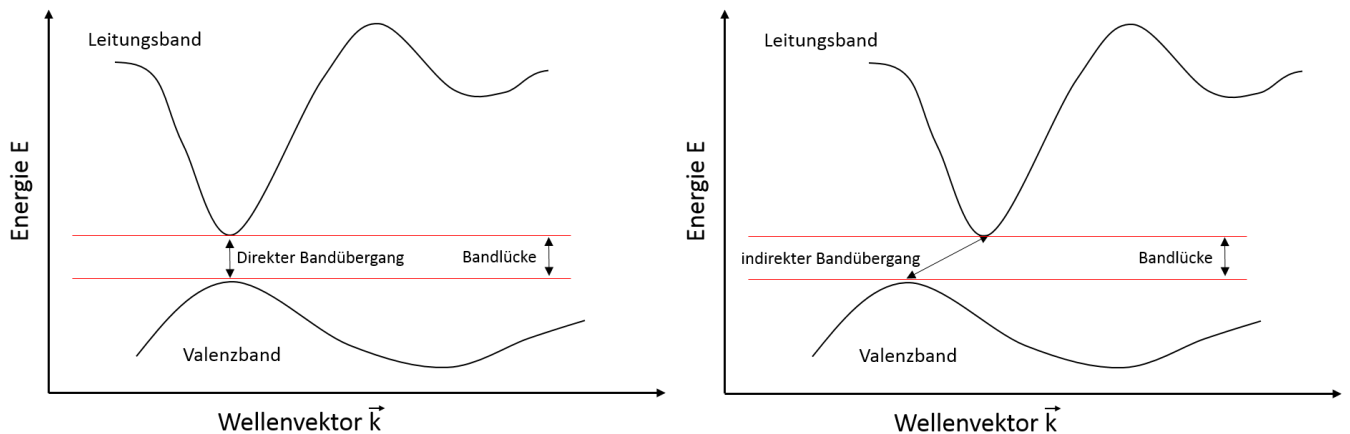


Abbildung 25: Direkter Bandübergang (links) und indirekter Bandübergang (rechts). Dabei ist  $\vec{k}$  der Wellenvektor. Bei einem direkten Bandübergang ist die Verschiebung zwischen dem Minimum und dem Maximum 0.

Sind das Minimum des Valenzbandes und das Maximum des Leitungsbandes verschoben spricht man von einem indirekten Bandübergang. Für Leuchtdioden werden im Allgemeinen Halbleiter mit einem direkten Bandübergang verwendet.

In dem vorangegangenen Beispiel ist dasselbe Trägermaterial p- bzw. n- dotiert. Eine solche Anordnung wird als Homostruktur bezeichnet. Wie in Abbildung 26 zu sehen, ist der klassische p-n Übergang einer Homostruktur sehr schmal, benötigt aber eine vergleichsweise große Kontaktfläche zwischen dem p- und dem n- dotierten Material, womit keine nennenswerte Lichtausbeute möglich ist.

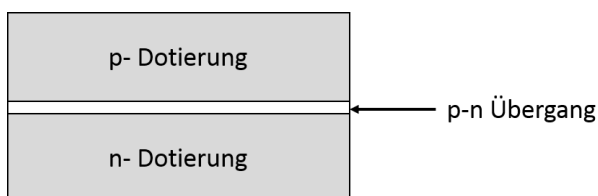


Abbildung 26: Klassische Anordnung einer Homostruktur. Werden p-dotiertes Silizium und n-dotiertes Silizium zusammengeführt, so bildet sich ein p-n Homoübergang.

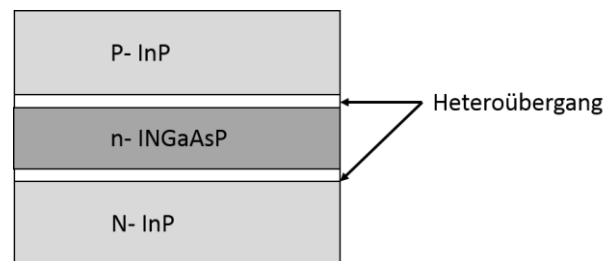


Abbildung 27: Doppelter Heteroübergang. Eine n-dotierte InGaAsP-Verbindung liegt zwischen zwei P- bzw. N-dotierten InP-Verbindungen.

Eine Möglichkeit größere Lichtintensitäten zu erzeugen ist eine „Sandwich“ Anordnung wie sie in Abbildung 27 dargestellt ist. In dem abgebildeten Beispiel liegt eine n-dotierte Indium-Gallium-Arsen-Phosphor Verbindung zwischen einer P-dotierten und einer N-dotierten Indium-Phosphor Verbindung. Im Gegensatz zur klassischen Anordnung werden verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Bandlücken verwendet. Eine solche Anordnung wird als doppelte Heterostruktur bezeichnet.

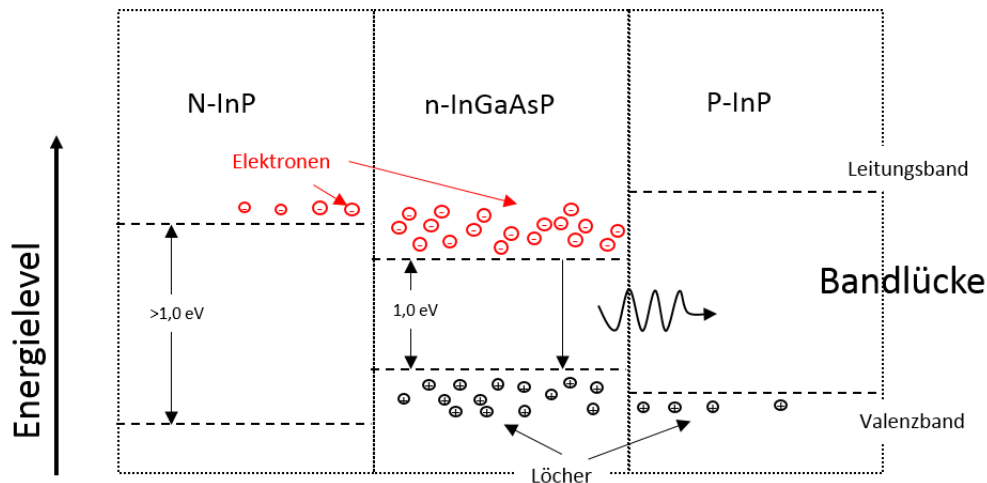


Abbildung 28: Bändermodell eines doppelten Heteroüberganges nach Abbildung 27. Die gestrichelten Linien symbolisieren die Leitungs- bzw. Valenzbänder der verschiedenen Materialien.

Abbildung 28 zeigt das Bändermodell für das in Abbildung 27 angegebene Beispiel. Die positiven und negativen Ladungsträger, bewegen sich von den Materialien mit der größeren Bandlücke in das Material mit der geringeren Bandlücke. Die doppelte Heterostruktur formt eine Barriere, welche die Rekombination der Elektronen-Lochpaare auf das Material mit der geringeren Bandlücke beschränkt.

Im Gegensatz zur Halogenlampe hat die LED einen begrenzten Spektralbereich, daher werden für die Allgemeinbeleuchtung in der Regel blaue Leuchtdioden mit Leuchtstoffen kombiniert, um weißes Licht zu mischen. Abbildung 29 zeigt LED-Spektren unterschiedlicher Farbtemperatur.

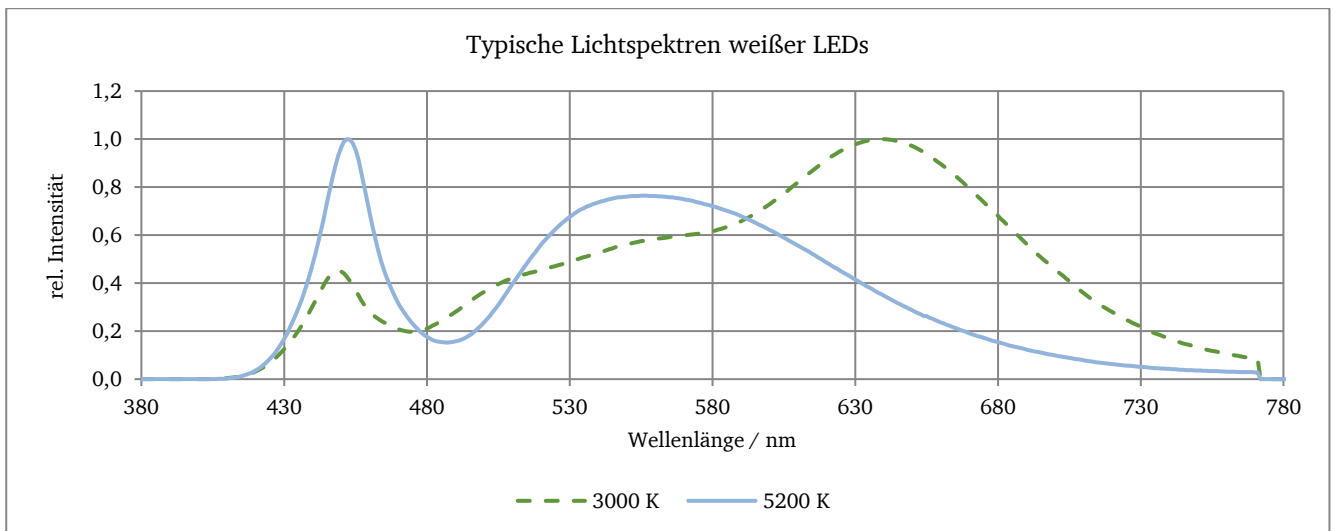


Abbildung 29: LED Lichtspektren für die Farbtemperaturen 3000 K und 5200 K. Die Lichtfarbe wird mit Hilfe von Leuchtstoffen gemischt.

Wie bei den Leuchtstofflampen ist bei weißen LEDs die Lichtfarbe abhängig von der verwendeten Leuchtstoffmischung. Anders verhält es sich bei einfarbigen LEDs, bei denen das Emissionsspektrum direkt von dem verwendeten Halbleitermaterial abhängig ist. So bestehen rote LED z.B. aus Galliumarsenidphosphid (GaAsP), während blaue LEDs aus Indiumgalliumnitrid

(InGaN) bestehen. Die typischen Lichtspektren blauer, grüner und roter LEDs sind in Abbildung 30 dargestellt.

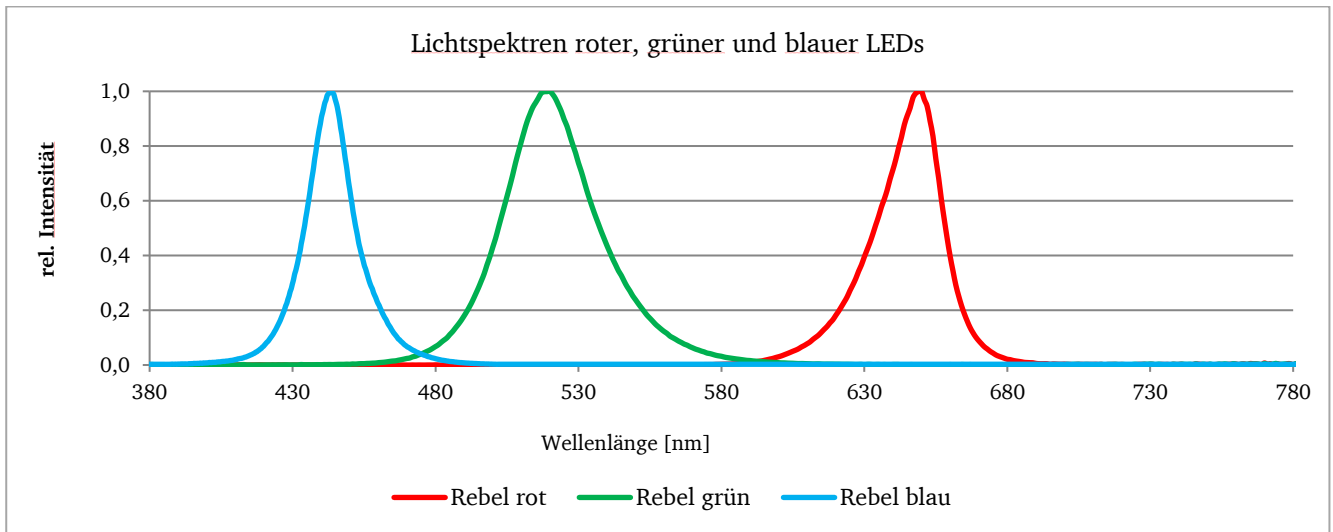


Abbildung 30: LED Lichtspektren für rote, grüne und blaue LED von Philips-Rebel.

## 2.6 Pulsweitenmodulation

Der Begriff Pulsweitenmodulation (PWM) wird häufig im Zusammenhang mit der Ansteuerung von LEDs verwendet. Bei der Pulsweitenmodulation wird eine technische Größe (z.B. der elektrische Strom) zwischen zwei Werten hin und her geschaltet und somit bei einer konstanten Frequenz der Tastgrad eines Rechteckpulses moduliert (Abbildung 31).

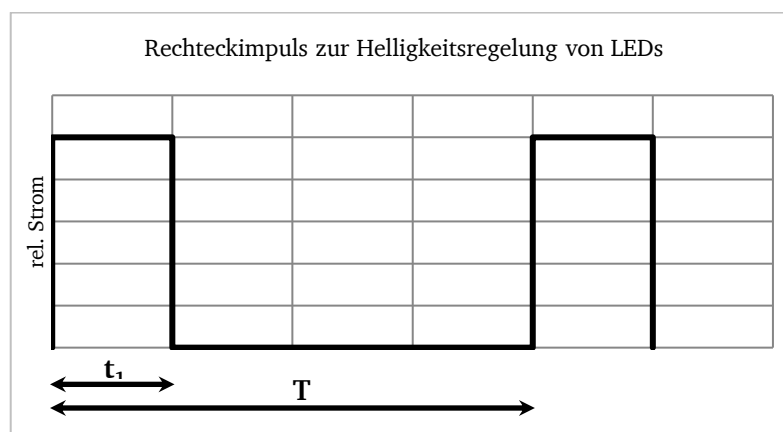


Abbildung 31: PWM-Signal mit einem Tastgrad von 25 %

Durch das periodische Verändern des Tastgrades des Rechtecksignals lässt sich der Gleichwert des elektrischen Stroms regeln, über welchen die LED betrieben wird (87).

$$\frac{t_1}{T} = 0,25 = 25 \% \quad (87)$$

Der Tastgrad ist dabei das Verhältnis zwischen der Impulsdauer  $t_1$  und der Periodendauer  $T$ . Mit Hilfe der PWM kann die Helligkeit von LEDs eingestellt werden. Dabei wird die LED in schneller Folge ein- und ausgeschaltet. Ist die Ein- und Ausschaltdauer hinreichend kurz nimmt das menschliche Auge nur die durchschnittliche Lichtstärke wahr. Die Taktfrequenz muss ausreichend hoch angesetzt werden (z.B. mehr als 200 Hz), damit das Auge Flimmern auch bei schnellen Bewegungen nicht mehr wahrnimmt [79].

## 2.7 Thermisches Management

Seitdem sich die LED sich als geeignetes Leuchtmittel in der Allgemeinbeleuchtung bewährt hat, stellt das thermische Management eine der größten Herausforderung beim Leuchtdesign dar. Insbesondere den speziellen thermischen Anforderungen von Hochleistungs-LEDs wird oft nicht genug Beachtung geschenkt.

LEDs können im Hochleistungsbereich mit Strömen von bis zu 1 A betrieben werden. Dabei werden in der Sperrschicht (p-n Übergang des Halbleiters) zwischen 60% - 65% der zugeführten elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Wenn es während des Betriebs zu einer Erhöhung der Betriebstemperatur kommt, führt dies zum einen zu einer Verringerung der Lichtausbeute, zum anderen zu einer Verkürzung der Lebensdauer der LED. Bei einer Überschreitung der maximal erlaubten Sperrschichttemperatur wird der Halbleiter zerstört.

Um das Betriebsverhalten der LED zu optimieren und eine Zerstörung durch Hitze zu vermeiden wird die Wärme in der Regel über passive Kühlkörper abgeführt. Die Kühlung basiert innerhalb der Leuchte meist auf dem Prinzip der Wärmeableitung und ist in Abbildung 32 dargestellt.

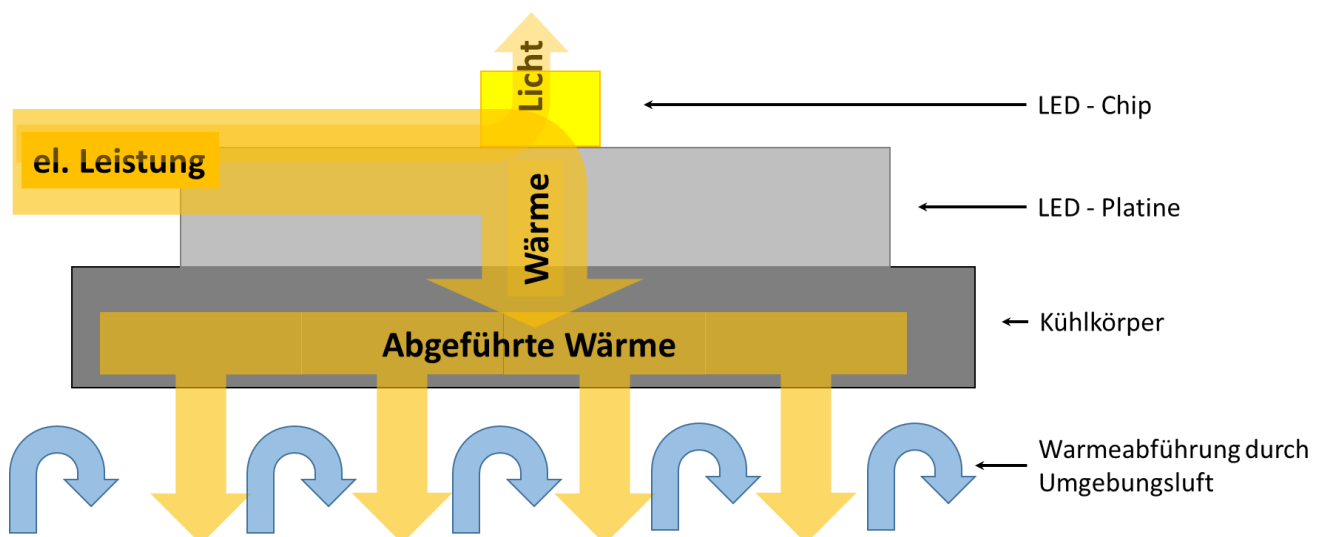


Abbildung 32: Prinzip der Wärmeleitung. Die von der LED erzeugte Wärme wird an einen Kühlkörper geleitet und dort an die Umgebung abgeführt.

Wärme fließt nur von heißeren zu kälteren Medien. Damit der Wärmetransfer stattfinden kann, muss ein physischer Kontakt zwischen der LED und dem Kühlkörper vorhanden sein. Die abgeleitete Hitze wird dann an die Umgebungsluft abgegeben.

## 2.8 Spektrometrie

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise von optischen Spektrometern. Die Spektrometrie befasst sich mit der wellenlängenabhängigen Bemaßung einer Strahlung. Im Rahmen dieser Arbeit ist mit einem Spektrum die Auftragung der optischen Strahlungsleistung über die Wellenlänge gemeint [42]. Bei der optischen Strahlung handelt es sich um eine elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von  $10^2$  nm bis  $10^6$  nm. Die optische Strahlung kann in drei Bereich unterteilt werden (DIN 5031-7): Ultraviolettstrahlung (UV-Bereich), sichtbare Strahlung (VIS-Bereich) und Infrarotstrahlung (IR-Bereich).

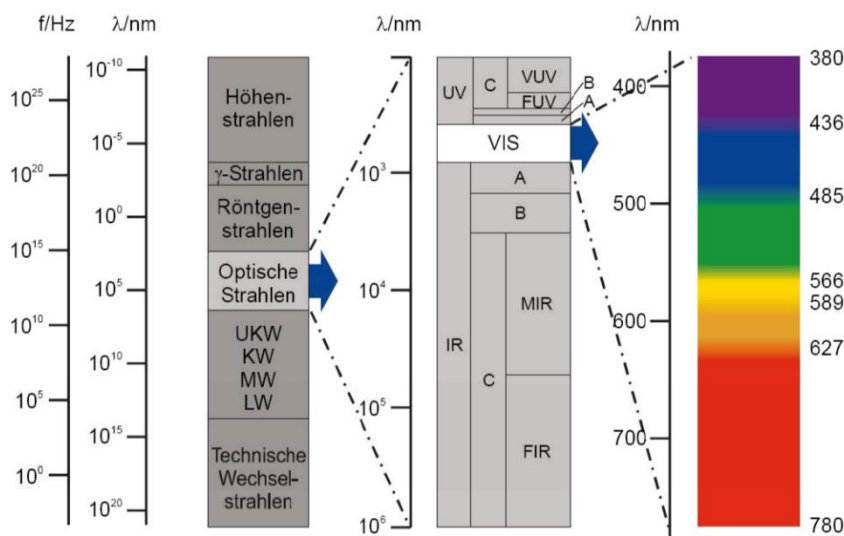


Abbildung 33: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung [42].

Die UV- und IR- Strahlung befinden sich im unteren bzw. im oberen Wellenlängenbereich und sind für den Menschen in der Regel nicht sichtbar. Der VIS-Bereich wird auch als Licht bezeichnet. Er ist, wie der Name bereits sagt, für das menschliche Auge sichtbar und befindet sich in der Regel im Bereich zwischen 380 nm und 780 nm.

Zentrales Element zur Messung eines Lichtspektrums ist ein dispersives Element, mit welchem das Licht in seine spektralen Anteile zerlegt werden kann [43]. Diese spektrale Zerlegung kann beispielsweise mit Hilfe eines Prismas oder eines Gitters vorgenommen werden.

Bei einem Prisma handelt es sich um einen geometrischen Körper, dessen Seitenkanten gleich lang und der ein Vieleck als Grundfläche hat. Die optischen Eigenschaften des Prismas hängen von den Winkeln, der Lage der optisch wirksamen Prismenflächen zueinander und vom Brechungsindex des Werkstoffes ab. Prismen, welche die wellenlängenabhängige Brechung des Lichtes ausnutzen, werden auch als Dispersionsprismen bezeichnet. Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes, wird das Licht aufgrund der wellenlängenabhängigen Brechzahl verschieden gebrochen. Jede Wellenlänge erfährt dabei eine andere Ablenkung. Das gebrochene Licht breitet sich als ein von der Eintrittsstelle her divergierendes Lichtbündel aus. Fällt das Licht jetzt auf eine weiße Fläche, wird das Spektrum der Lichtquelle sichtbar.



Das optische Gitter ist ein optisches Bauelement zur Beugung von Licht [43]. Beugungsgitter können aufgrund ihrer Funktionsweise in Transmissionsgitter und Reflexionsgitter unterteilt werden (Abbildung 34). Transmissionsgitter bestehen aus einer Reihe durchlässiger (Lücken) und undurchlässiger Bereiche (Stege). Wenn Licht auf ein Transmissionsgitter trifft wird es an den Stegen reflektiert bzw. absorbiert und nur an den Lücken durchgelassen, wodurch das transmittierte Licht an Intensität verliert.

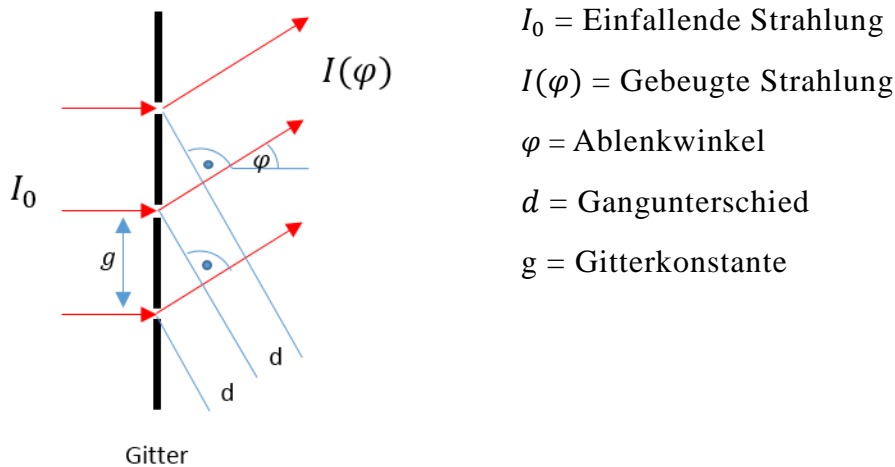


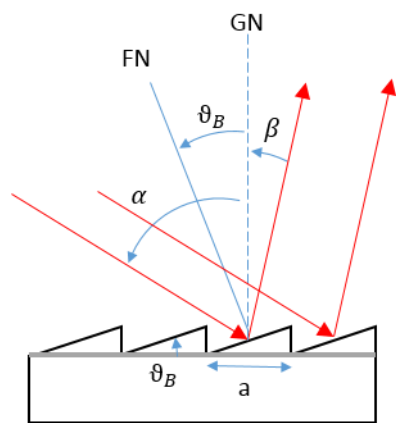
Abbildung 34: Beugung am Transmissionsgitter.

Die Stärke der Aufspaltung der Wellenlänge ist dabei abhängig von dem Abstand der Gitterlinien  $d$ . Die Gitterkonstante gibt die Periode des Gitters an. Die Gitterstruktur kann z.B. parallel und linienartig sein. Trifft Licht auf eine Gitterstruktur, werden Linien konstruktiver Interferenz erzeugt. Abhängig von der Wellenlänge wird das Licht in verschiedene Richtungen als monochromatisches Licht abgelenkt. Dabei ergibt sich der Ablenkungswinkel  $\varphi_n$  aus dem Gangunterschied  $d_n$  und ist abhängig von der Gitterkonstante  $g$  und der Wellenlänge  $\lambda$  sowie der Ordnung  $n$ .

$$d_n = n \cdot \lambda = g \cdot \sin(\varphi_n) \quad (88)$$

Reflexionsgitter bestehen aus einer Reihe von reflektierenden Stegen und Furchen. Trifft Licht unter einem bestimmten Einfallswinkel auf ein Beugungsgitter, so wird in benachbarten Bereichen (z. B. Steg und Furche) ein Gangunterschied von einem ganzzahlig Vielfachen der Wellenlänge erzeugt, was zu konstruktiver Interferenz und dadurch zur Auffächerung der auftretenden Strahlung führt. Im Gegensatz zu den Transmissionsgittern geht hier weniger Licht verloren.

Eine Sonderform der Reflexionsgitter ist das Blazegitter (Abbildung 35), welches generell bei Spektrometern zum Einsatz kommt. Die reflektierende Oberfläche des Blazegitters hat ein sägezahnähnliches Profil. Die Stufen der Sägezahnstruktur sind dabei um einen bestimmten Winkel  $\vartheta_B$  (Blazewinkel) gegen die Gitterfläche geneigt.



GN = Gitternormale

FN = Furchennormale

$\alpha$  = Einfallswinkel der einfallenden Strahlung

$\beta$  = Reflexionswinkel der gebeugten Strahlung

$\vartheta_B$  = Blazewinkel

$a$  = Gitterlinienabstand

Abbildung 35: Beugung am Blaze Reflexionsgitter

Trifft Strahlung mit dem Winkel  $\alpha$  auf die reflektierenden Stufen, wird es gebeugt und unter dem Winkel  $\beta$  wieder reflektiert. Dabei ist der Winkel  $\beta$  abhängig von der Wellenlänge. Der Gangunterschied ist definiert über (89).

$$d_n = a(\sin(\alpha) + \sin(\beta)) = n \cdot \lambda \quad (89)$$

### Aufbau von Gitter-Spektrometern

Bei der Messung eines Lichtspektrums wird die optische Strahlung über den Messkopf eingekoppelt. Über die Optik wird der Strahlengang an den Monochromator angepasst. Der Monochromator besteht aus einem Gitter, welches das auftreffende Lichtspektrum in seine Wellenlängen auffächert und an den Empfänger weitergibt. Abbildung 36 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Gitter-Spektrometers wie es im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde.

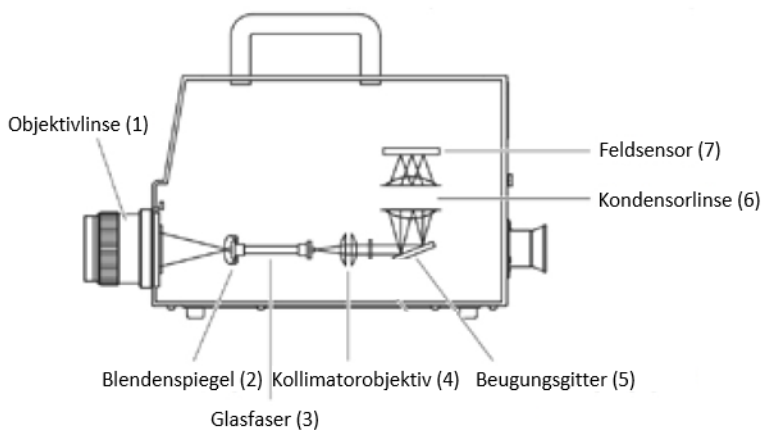


Abbildung 36: Prinzipieller Aufbau eines Spekt-roradiometers (Konica Minolta).

Einfallendes Licht wird in einer Linse (1) gebündelt und fällt auf einen Blendenspiegel (2). Über eine Öffnung in der Mitte des Blendenspiegels wird das Licht in ein Glasfaserstück (3) eingekoppelt über ein Kollimatorobjektiv (4) auf ein Beugungsgitter (5) projiziert. Am Gitter wird das Licht in seine wellenlängenabhängigen Bestandteile aufgefächert. Danach wird das Licht mit einer Kondensorlinse (6), nach Wellenlängen sortiert und auf einen Feldsensor (7)

---

fokussiert. Durch die bekannten Eigenschaften des Beugungsgitters können auf dem Sensor die einzelnen Wellenlängen bestimmt werden. Ein A/D Wandler wandelt die auf den Feldsensor treffende Strahlung über die Photonen-Strom-Spannung-Wandlung schließlich in digitale Werte um.

## 3 Aufbau und Methodik zur Untersuchung des Farb- abstandes

Der folgende Abschnitt beschreibt den Aufbau, die Methodik und den Versuchsablauf. Während eines Versuchsdurchlaufes vergleicht die Testperson zwei weiße Flächen miteinander, die mit unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet werden. Die Testperson kann über ein Bedienelement das Spektrum der einen Lichtquelle verändern, um es visuell an das zweite Spektrum anzupassen.

### 3.1 Aufbau zur Untersuchung des visuellen Abgleiches

Im folgenden Kapitel werden der Versuchsaufbau und Versuchsablauf beschrieben.

#### 3.1.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den visuellen Abgleich von Lichtquellen mit Farbtemperaturen von 5200 K und 2700 K. Der Aufbau für den Paarvergleich besteht aus einer Box, die in zwei nebeneinander angebrachten Kammern aufgeteilt ist (Abbildung 37).

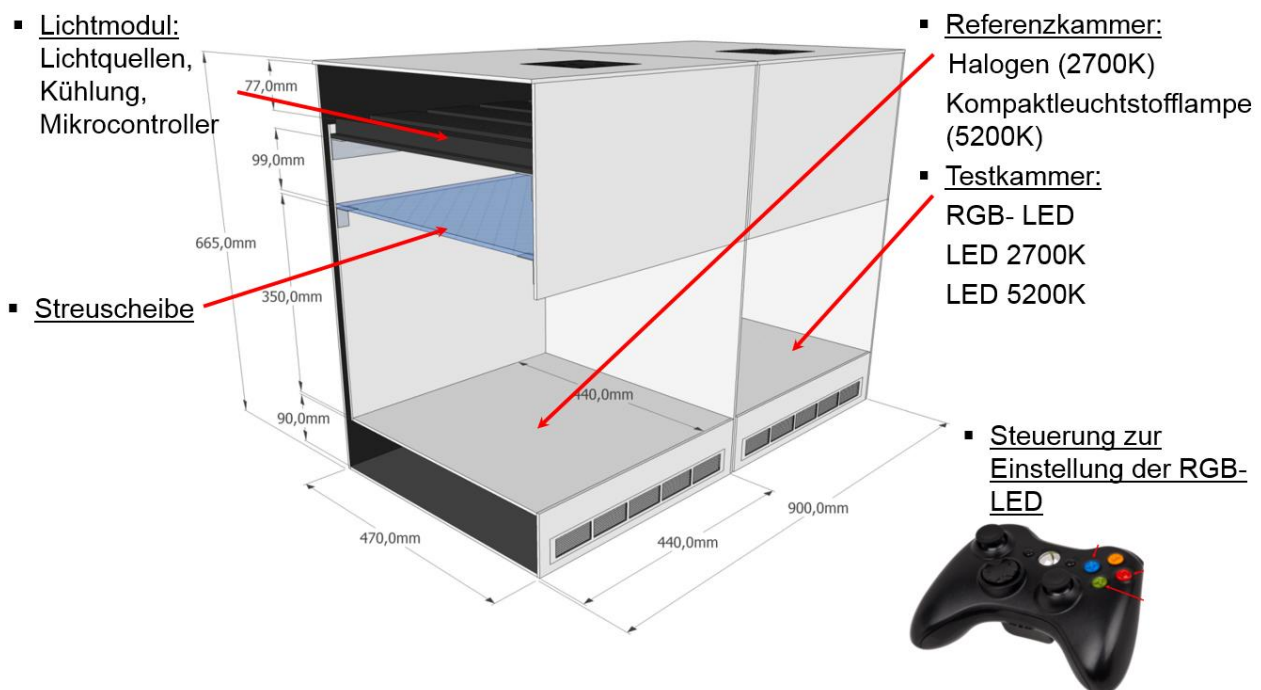


Abbildung 37: Testaufbau zur Untersuchung des visuellen Abgleiches. Der Aufbau ist für einen Paarvergleich ausgelegt. Es können immer nur zwei Lichtquellen gleichzeitig miteinander verglichen werden.

Das von den Lichtquellen emittierte Licht wird mit Hilfe einer Streuscheibe gleichmäßig in den beiden Kammern verteilt. Bei der Streuscheibe handelt es sich um eine farblose, matte Plexiglasscheibe mit einer Dicke von 6 mm und einer Fläche von  $0,2 \text{ m}^2$ . Sie besitzt eine Transmission von 92 % und bleibt für die Wellenlängen des sichtbaren Bereiches mit einer prozentualen Standardabweichung von 3 % relativ unverändert. Ihr Transmissionsspektrum ist in Anhang A in Abbildung 105 dargestellt. Die Streuscheibe trennt die Lichtquellen von der Test- bzw. der Referenzkammer.

Der Innenraum der beiden Kammern ist mit einer matt weißen Oberfläche (PVC-Folie) beschichtet. Sie weist eine Reflexion von 80 % auf und bleibt über die Wellenlängen 430 nm bis 780 nm mit einer prozentualen Standardabweichung von 4,6 % relativ stabil. Ihr Reflexionsspektrum ist im Anhang A in Abbildung 104 dargestellt. Abbildung 38 zeigt die Leuchtdichteaufnahmen der Referenz- und Testkammer.

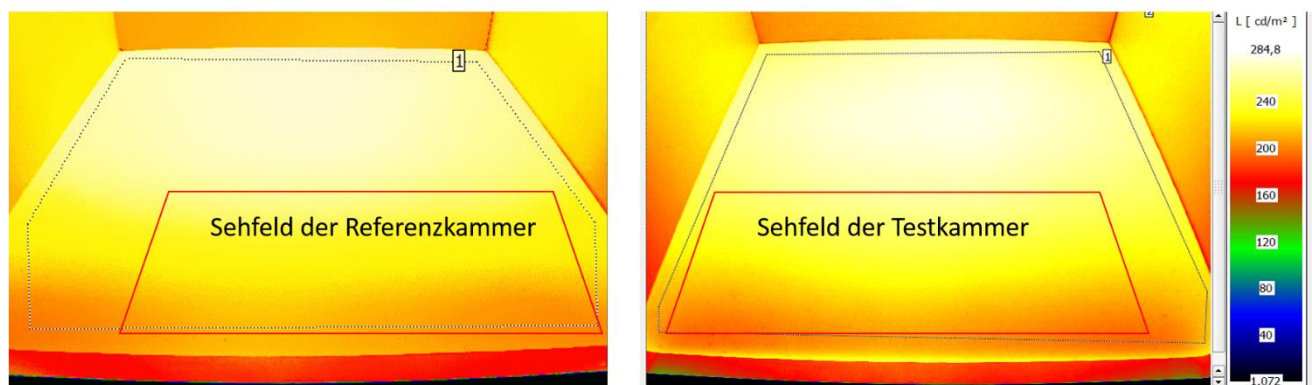


Abbildung 38: Leuchtdichteaufnahme des Innenraums des Versuchsaufbaus. Die Leuchtdichte im Bereich der Sehaufgabe befand für beide Kammern auf einem mittleren Wert von  $230 \text{ cd/m}^2$ . Das rot umrahmte Feld markiert die Bereiche welche die Probanden auf dieselbe Lichtfarbe einstellen sollten.

Die Abbildung zeigt für den hinteren Bereich der beiden Kammern etwas höhere Leuchtdichtewerte als für den vorderen Bereich. Im Mittel wichen die Werte um 20 % voneinander ab. Obwohl die Vorversuche ergeben haben, dass dieser Unterschied von den meisten Probanden nicht wahrgenommen wurde, wurde eine zusätzliche Blende vor dem Aufbau angebracht um den Sichtbereich auf den relevanten Bereich der Sehaufgabe zu begrenzen. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass alle Testpersonen eine gleichmäßig ausgeleuchtete Fläche sehen. Die Rückseite der Blende ist mit der gleichen PVC-Folie ausgestattet wie sie auch für den Innenbereich der Kammer verwendet wurde. Durch die zusätzliche Fläche wurde das Feld der Sehaufgabe noch gleichmäßiger ausgeleuchtet wie in Abbildung 39 zu sehen ist.

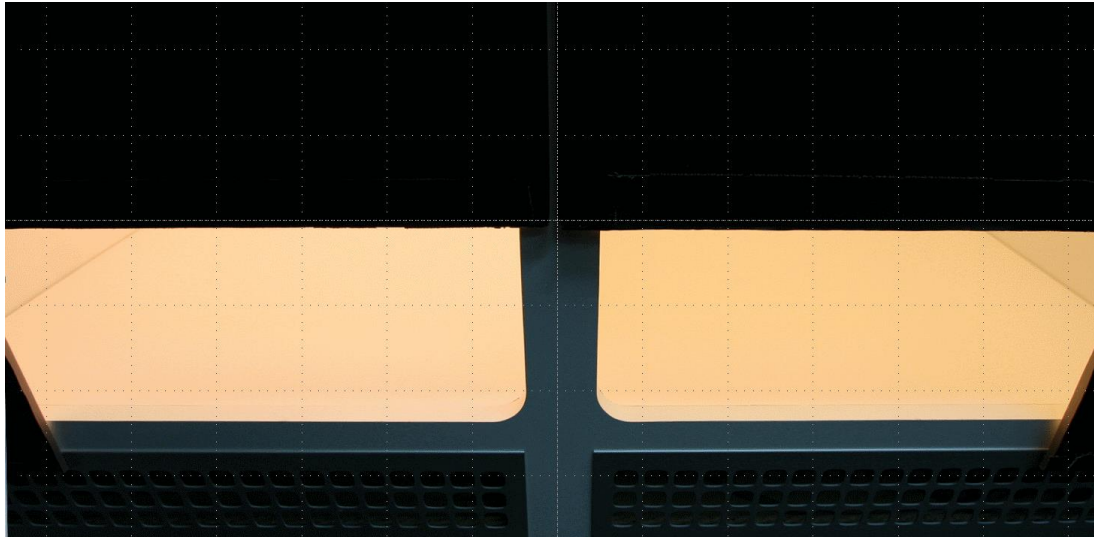


Abbildung 39: Frontansicht des Versuchsaufbaus. Referenzkammer (links) und Testkammer (rechts) befinden sich auf derselben mittleren Beleuchtungsstärke von 800 lx mit einer prozentualen Abweichung von 10 %.

Um einen möglichst genauen Abgleich zu erreichen sollte im Rahmen dieser Arbeit der Farb-  
abgleich direkt von den Versuchspersonen eingestellt werden. Die Lichtquellen der Testkam-  
mer können über einen X-Box Controller angesteuert werden (Abbildung 40).



Abbildung 40: X-Box Controller wie er im Rahmen dieser Arbeit für die Einstellung der  
Lichtfarbe verwendet wurde (rechts) [Bildquelle: [www.Xbox.com](http://www.Xbox.com)]. Als Farbraum für  
die Ansteuerung der Farben wurde der  $La^*b^*$  Farbraum verwendet (Abschnitt 2.3.6).

Für die Farbmischung wird das  $La^*b^*$ -Modell verwendet. Dabei entsprechen die Bewegungs-  
richtungen des Steuerkreuzes den Bewegungsrichtungen innerhalb des Farbraumes. Zusätzlich  
kann über den Controller die Helligkeit verändert werden, sowie die eingestellten Farbkoordi-  
naten gespeichert werden. In Tabelle 2 sind die Funktionen beschrieben, die beim Drücken der  
einzelnen Tasten ausgeführt werden.

Tabelle 2: Zugewiesene Tastenfunktionen zur Ansteuerung der Lichtquellen der Testkammer.

<b>Taste</b>	<b>Funktion</b>
Steuerkreuz (Oben)	Verschieben ins Gelbliche
Steuerkreuz (Unten)	Verschieben ins Bläuliche
Steuerkreuz (Links)	Verschieben ins Grünliche
Steuerkreuz (Rechts)	Verschieben ins Rötliche
A	Speichern der Farbwertanteile $a^*b^*$
B	Änderung der Helligkeit L. Helligkeit wird erhöht
Y	Änderung der Helligkeit L. Helligkeit wird verringert
X, Start, Back, Xbox	Keine zugewiesene Funktion

Vor dem Versuch wurden Referenz- und Testkammer auf dasselbe Beleuchtungsniveau eingestellt. Bei der anschließenden Versuchsdurchführung wurde bei einer Änderung der spektralen Anteile die Helligkeit automatisch nachgeregelt. Vorversuche hatten allerdings ergeben, dass Probanden einen leichten Helligkeitsunterschied wahrnehmen konnten, obwohl in beiden Kammern dieselbe, mittlere Beleuchtungsstärke gemessen wurde. Um den Einfluss des wahrgenommenen Helligkeitsunterschiedes auf die Bewertung des Farbabgleiches zu vermeiden, kann das Helligkeitsniveau über die Tasten Y und B verändert werden.

---

### 3.1.2 Aufbau der Lichtmodule

Die Lichtquellen der Referenzkammer und der Testkammer sind auf separaten Modulen angebracht. Im Folgenden soll der Aufbau der Lichtmodule beschrieben werden. Der prinzipielle Aufbau der Module ist in Abbildung 41 dargestellt. Sowohl das Referenzmodul, als auch das Testmodul bestehen aus einer Vorschaltелеktronik, einer Kühleinheit und den Leuchtmitteln.

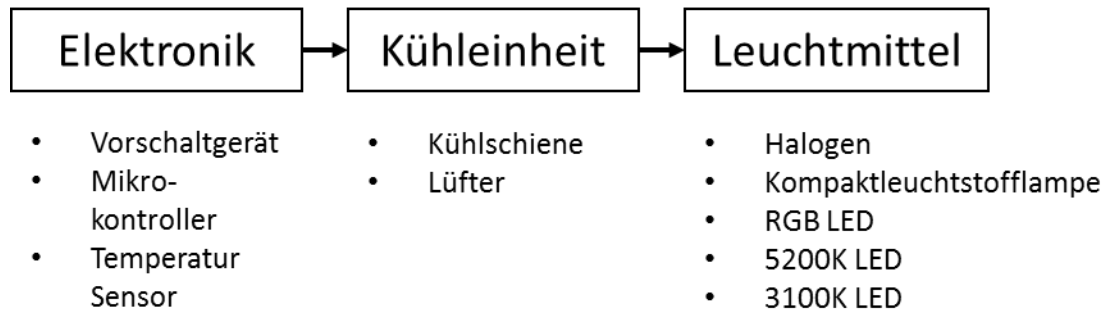


Abbildung 41: Prinzipieller Aufbau der Lichtmodule. Ein Lichtmodul besteht aus der Elektronik, einer Kühleinheit und den Lichtquellen.

Für beide Module wird eine am Fachgebiet Lichttechnik entwickelte Leiterplatte verwendet. Kernstück der Elektronik ist ein Mikrokontrolller vom Typ FEZ-Panda, der die Kühlung und Leuchtmittel steuert.

#### **LED: Lichtspektren der verwendeten Lichtquellen**

Die Referenzlichtquellen befinden sich in der linken Kammer. Sie werden mit den Lichtquellen der rechten Kammer verglichen werden. Die Emissionsspektren der für den Versuch verwendeten Lampen sind in den Abbildungen Abbildung 42 und Abbildung 43 veranschaulicht.



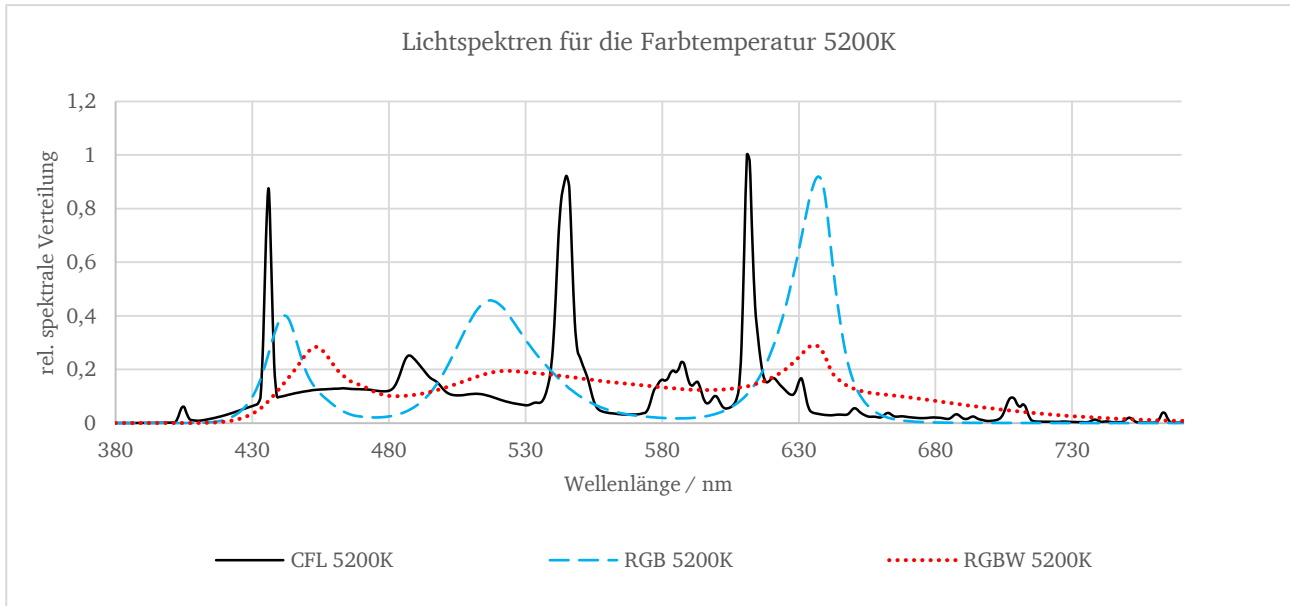


Abbildung 42: Drei Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 5200 K, aber unterschiedlichen Lichtspektren. Das Lichtspektrum CFL5200K ist das Referenzspektrum auf welches die LED Vergleichsspektren RGB5200K und RGBW5200K abgeglichen werden.

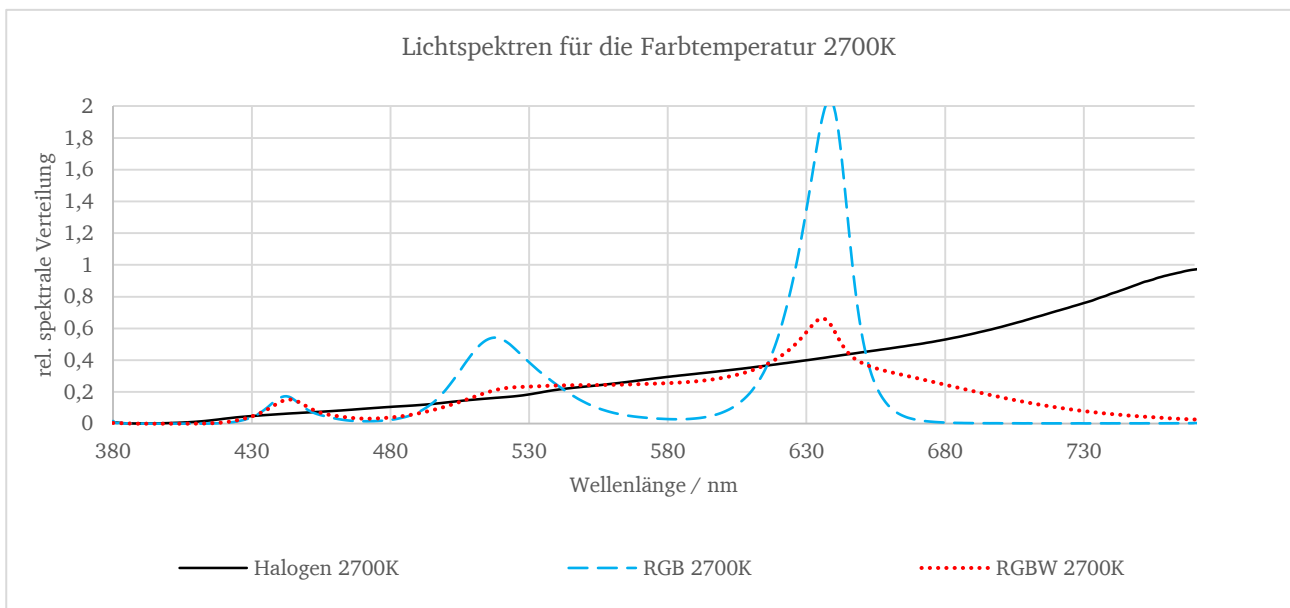


Abbildung 43: Drei Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 2700 K, aber unterschiedlichen Lichtspektren. Das Lichtspektrum Halogen 5200K ist Referenzspektrum auf welches die LED Vergleichsspektren RGB2700K und RGBW2700K abgeglichen werden.

In der linken Kammer befinden sich eine Kompaktleuchtstofflampe und Halogenlampen. Die Kompaktleuchtstofflampe (CFL5200K) dient als Referenz für die Farbtemperatur 5200 K. Ihr spektraler Verlauf ist in Abbildung 42 angegeben. Sie hat das für Entladungslampen typische Lichtspektrum mit Peaks bei den Wellenlängen 435,8 nm (Blau), 546 nm (grün) und 600 nm (rot). Die Wellenlängen zwischen den Peaks sind aufgefüllt, so dass sich ein Farbwiedergabeindex von mehr als 90 ergibt. Die Halogenglühlampen (Halogen 2700K) sind die Referenz für die Farbtemperatur 2700 K (Abbildung 43). Ihre Spektren weisen zwischen 380 nm bis 780 nm einen ansteigenden Verlauf ohne Einbrüche auf und ermöglichen so einen Farbwieder-

gabeindex von mehr als 99. Die Farbtemperatur, der Farbwiedergabewert und der Farbtort der beiden Referenzlichtquellen sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Farbwiedergabeindex und Farbtemperatur der verwendeten Referenzlichtquellen. Die Lichtspektren sind mit den Normspektralwertfunktionen von 1964 bewertet und für die Farbtorte in  $u'v'$  sowie in  $a_{99}$  und  $b_{99}$  angegeben.

	Farbtemperatur	Farbwiedergabeindex	Farbtort			
			$u'10^\circ$	$a_{99}$	$v'10^\circ$	$b_{99}$
Kompakt-leuchtstofflampe	5279 K	91	0,2074	0.007	0,4868	0.017
Halogen	2666 K	99	0,2676	0,0002	0,5290	0.0003

In der rechten Kammer sind RGB-LEDs sowie weiße LEDs mit unterschiedlicher Farbtemperatur angebracht. In dieser Arbeit wurden für die Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K jeweils zwei Spektren gemischt, wobei für eine der Mischungen nur RGB-LEDs verwendet wurden. Diese RGB-Mischungen RGB2700K und RGB5200K bestehen aus schmalbandigen Spektren mit Peaks bei den Wellenlängen 440 nm, 510 nm und 630 nm (siehe Abbildung 42 und

Abbildung 43). Durch die fehlenden spektralen Anteile zwischen den Peaks ergibt sich ein Farbwiedergabewert von 30 für die RGB 5200 K Mischung und eine Farbwiedergabe von 8 für die RGB 2700 K Mischung.

Für das zweite Mischspektrum werden zusätzlich zu den RGB-LEDs weiße LEDs verwendet um die fehlenden spektralen Anteile im Spektrum aufzufüllen. Das Mischspektrum für die Farbtemperatur 5200 K verwendet das in Abbildung 42 angegebene Spektrum RGBW5200K während für die Farbtemperatur 2700 K das in Abbildung 43 angegebene Lichtspektrum verwendet wird. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete warmweiße LED hatte dabei eine Farbtemperatur von 3100 K, was den Abgleich auf die Halogenreferenz erschwerte. Zu diesem Zweck wurde der Blauanteil der 3100 K LED mit Hilfe eines Filters herausgenommen.

Die Farbtemperaturen und Farbwiedergabeindizes sind für die vier Mischspektren in Tabelle 4 angegeben. Die Farbtorte sind mit den Normspektralwertfunktionen von 1964 für das  $10^\circ$ - Gesichtsfeld berechnet und in  $u'v'$  angegeben. Die Farbtorte der Mischspektren und der Referenzen stimmen mit einer maximalen Abweichung von  $\Delta u'v'(10^\circ) = 0,002$  miteinander überein.

Tabelle 4: Farbwiedergabeindex und Farbtemperatur der verwendeten Lichtquellen. Die Farborte sind in  $u'v'$  sowie in  $a_{99}$  und  $b_{99}$  angegeben.

	Farbtemperatur	Farbwiedergabeindex	Farborte			
			$u'10^\circ$	$a_{99}$	$v'10^\circ$	$b_{99}$
RGB5200K	5273 K	30	0,2074	0,007	0,4868	0,017
RGBW5200K	5294 K	92				
RGB2700K	2669 K	8	0,2676	0,0002	0,5290	0,0003
RGBW2700K	2677 K	91				

### LED: Temperaturverhalten von LEDs

Das Spektrum einer LED und somit auch ihr Farbort sind temperaturabhängig. Die Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der Wellenlängenverschiebung von vier monochromatischen LEDs bei sich ändernder Temperatur. Für Temperaturen zwischen 40 °C und 80 °C wurde bei einem konstanten Strom von 350 mA gemessen. Die Temperatur wurde über einen Temperatursensor aufgenommen welcher auf der Rückseite der LED war. Die Temperatur konnte dabei über eine Peltierelement geregelt bzw. für die Messung stabil gehalten werden. Der prinzipielle Messaufbau ist in Abbildung 44 dargestellt.

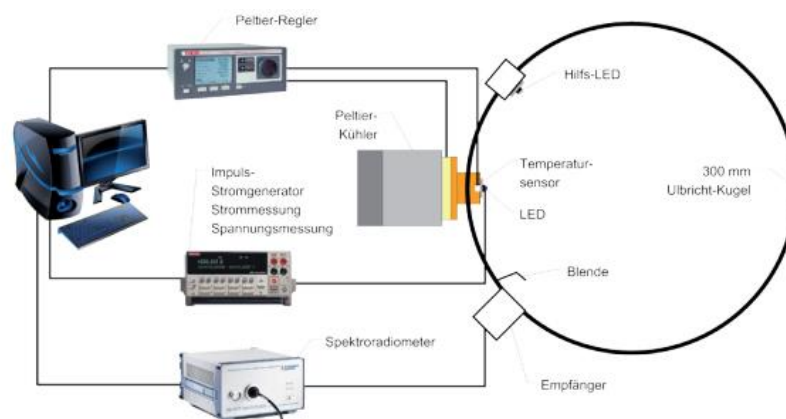


Abbildung 44: Prinzipieller Messaufbau zur Temperaturmessung von LEDs. Die LED wird auf einem Peltierkühler montiert, über welchen die LED auf einer eingestellten Temperatur stabil gehalten werden kann. Der Steuerstrom und die Betriebstemperatur sind entweder manuell einstellbar oder können über einen Rechner geregelt werden. Mit dem verwendeten Spektrometer kann der Farbort  $x,y$  mit einer Abweichung von  $\pm 0,0015$  gemessen werden [69]

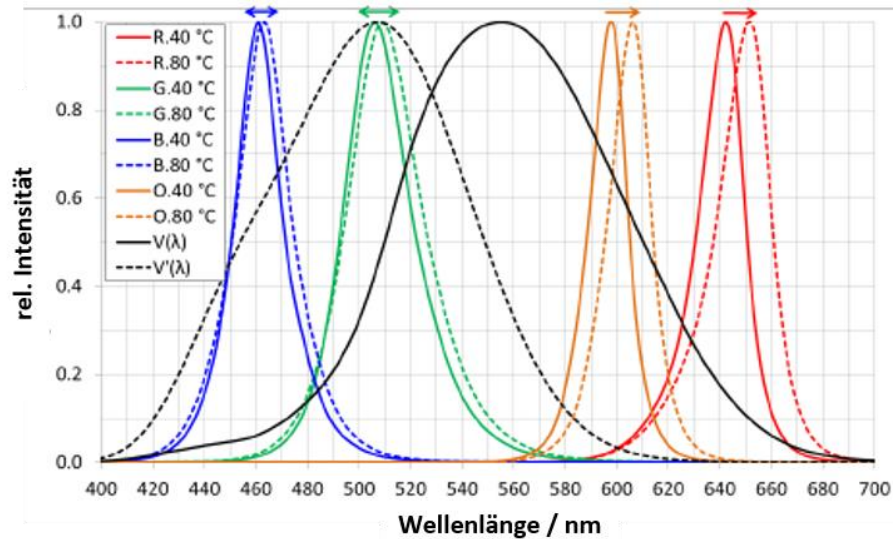


Abbildung 45: Wellenlängenverschiebung vier monochromatischer LEDs in Abhängigkeit der Temperatur, sowie Hellempfindlichkeitskurven für den photopischen  $V(\lambda)$  und den skotopischen  $V'(\lambda)$  Bereich. Die Messung wurde am Fachgebiet Lichttechnik durchgeführt [58].

Für alle LEDs bewirkt die steigende Temperatur eine Verschiebung der Lichtspektren zu den längeren Wellenlängen. Allerdings ist die Verschiebung der orangen und roten LEDs deutlich stärker als die der grünen und blauen LEDs.

Abbildung 46 zeigt den Farbabstand der vier farbigen LEDs in Abhängigkeit der Temperatur. In dem abgebildeten Beispiel wird von dem gemessenen Farbort bei einer Temperatur von 80 °C und einem Betriebsstrom von 350 mA als Referenzpunkt ausgegangen. Die Berechnung des Farbabstandes wurde für den Farbraum  $u'v'$ -Farbdiagramm durchgeführt.

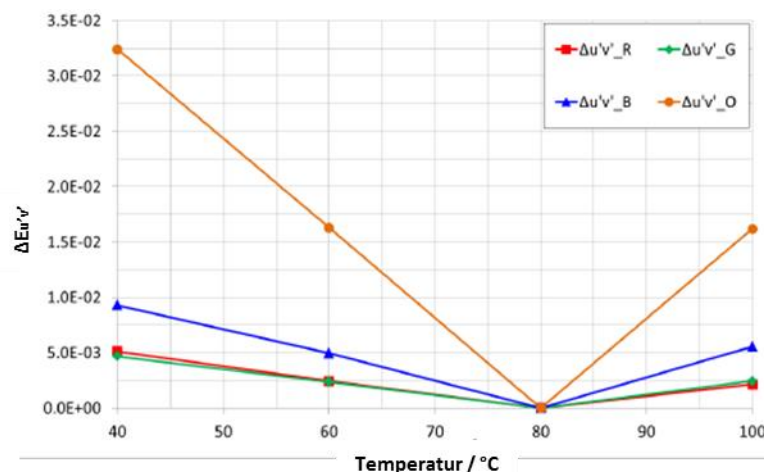


Abbildung 46: Einfluss der Temperatur auf die Farbortverschiebung von vier monochromatischen LEDs betrieben bei einem konstanten Strom von 350 mA. [58]

In dem Beispiel in Abbildung 46 sind deutlich größere Abstände der orangefarbenen LED mit sich ändernder Temperatur zu erkennen. Bei einer Temperatur von 40 °C und einer Messunsicherheit von  $\pm 0,0015$  ist der Farbabstand mit einem Wert von 0,0325 mehr als dreimal so groß wie der Abstand der blauen LED und fast sechsmal so groß wie für die grüne, bzw. rote LED.

Ausgehend von einem linearen Anstieg ergibt sich für die blaue LED zwischen 40 °C und 80 °C eine Steigung von  $0,00023$ , für die rote und grüne LED ergibt sich eine Steigung von  $1,25 \cdot 10^{-4}$ . Somit ergibt sich z.B., dass der Farbabstand für die blaue LED alle 5 °C um einen Abstand  $\Delta u'v'$   $1,25 \cdot 10^{-3}$  ansteigt und die rote und grüne LED um  $6,25 \cdot 10^{-4}$ .

Abbildung 47 zeigt den Farbabstand von diversen warmweißen LEDs in Abhängigkeit der Temperatur. Wie die farbigen LEDs werden auch diese LEDs bei einem Strom von 350 mA betrieben.

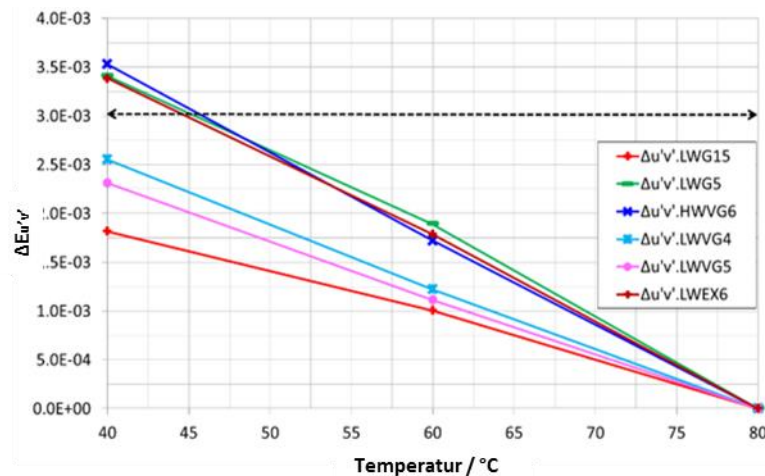


Abbildung 47: Einfluss der Temperatur auf den Farbort verschiedener warmweißen LEDs betrieben bei einem konstanten Strom von 350 mA [58].

Die Abbildung zeigt eindeutig das Ansteigen des Farbabstandes mit abnehmender Temperatur. Ausgehend von einem linearen Anstieg nimmt der Farbabstand alle 5 °C je nach LED um Werte zwischen  $0,0002$  und  $0,0004$  zu.

Der menschliche Sehapparat ist in der Lage bei einem direkten Vergleich kleinste Farbunterschiede wahrzunehmen. Die Größe des wahrnehmbaren Unterschiedes ist abhängig von den zu vergleichenden Lichtquellen. Ausgehend vom  $u'v'$  Farbdiaagramm beträgt der kleinste wahrnehmbare Farbunterschied für den gelblich-orangen Bereich  $0,003$  und für den rötlichen Bereich etwa  $0,004$ . Für weißes Licht sind die wahrgenommenen Abstände ähnlich vergleichbar (siehe Abschnitt 1.1) Es kann ausgehend von den vorangegangenen Untersuchungen angenommen werden, dass für Temperaturänderungen von etwa 5 °C kein Unterschied wahrgenommen wird. [47]

### Dimmverhalten von LEDs bei konstanter Temperatur

Für die Dimmung werden 12 Bit PWM- Regler verwendet, womit bis zu 4096 Einstellungen pro LED möglich sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde allerdings nur von 2048 Einstellungen Gebrauch gemacht. Die Elektronik bietet die Möglichkeit, die verwendeten Leuchtmittel über den Strom oder über ein PWM-Signal zu dimmen. Für diese Arbeit ist die Stabilität der Farborte entscheidend, weswegen auf die Stromdimmung verzichtet wurde. Der Farbort ist bei der Verwendung einer PWM-Dimmung zwar stabiler, aber nicht unempfindlich gegenüber Verschiebungen. Abbildung 48 zeigt die Farbortverschiebung und Spektren der roten LED für di-

verse Dimmstufen zwischen 20 % und 80 %. Die Prozentzahlen sind auf den maximal verwendeten Einstellwert bezogen.

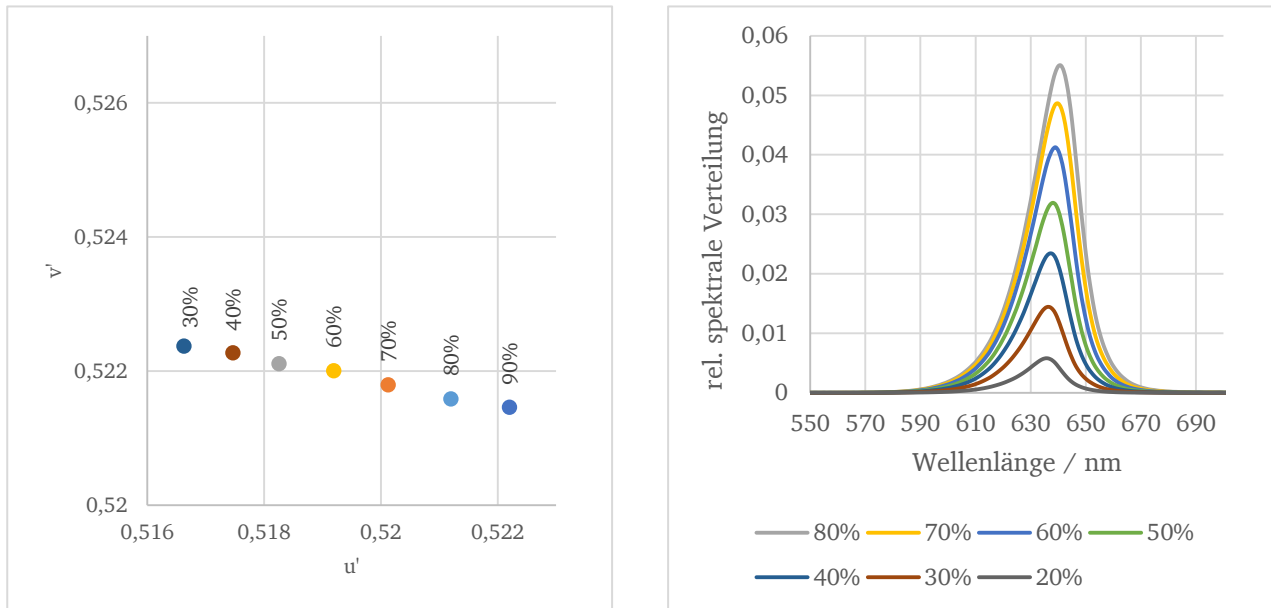


Abbildung 48: Farborte der roten LED dargestellt im  $u'v'$ -Diagramm, sowie deren Lichtspektren für verschiedene Dimmstufen. Die Prozentangaben beziehen sich auf den maximalen Einstellwert, bei dem die LED betrieben wird. Gemessen wurde bei einer konstanten Temperatur von 30 °C.

Aus der Abbildung kann man die starke kontinuierliche Verschiebung des Farbortes entlang der  $u'$ -Achse erkennen. Eine Verschiebung entlang der  $v'$ -Achse ist zwar vorhanden, allerdings ist diese relativ gering verglichen mit der Verschiebung entlang der  $u'$ -Achse. Das Spektrum verschiebt sich, je stärker die LED gedimmt wird. Wenn man von einer 20 % Dimmung ausgeht, hat das Spektrum sein Maximum bei 638 nm. Wird die Dimmung auf 80 % erhöht, verschiebt sich das Maximum auf 641 nm.

### Regelung der Kühlung

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der LEDs wurden die Module mit einer Kühleinheit ausgestattet. Diese besteht aus einer Kombination von aktiven und passiven Kühlelementen. Die passive Kühlung wird durch einen Kühlkörper realisiert. Es handelt sich dabei um Kühl-schienen mit einer Länge und Breite von 440 mm. Die aktive Kühlung erfolgt über zwei Lüf-ter, welche über den Mikrocontroller reguliert werden können. Die Abbildungen Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die Anordnung der Lichtquellen auf den Kühlkörpern.

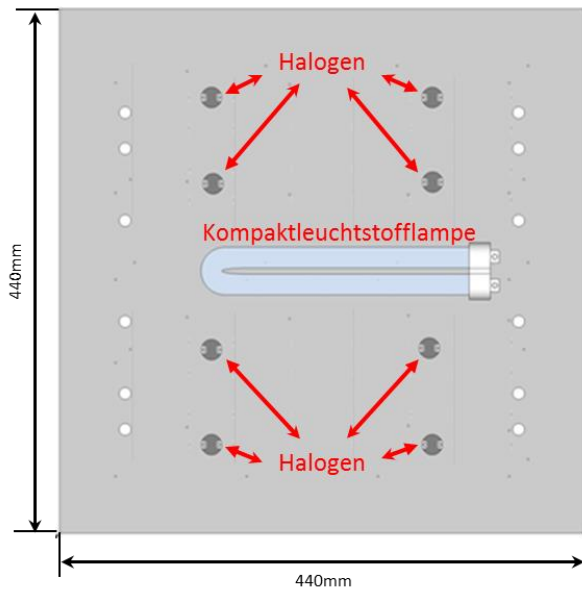


Abbildung 49: Anordnung der Lichtquellen auf dem Referenzmodul. Auf dem Modul befinden sich eine 5200 K Kompaktleuchtstofflampe und acht Halogenlampen (2700 K).

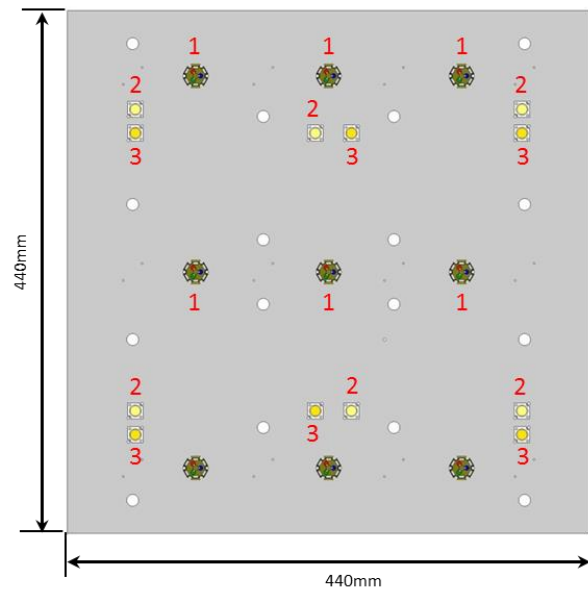


Abbildung 50: Anordnung der Lichtquellen auf dem Testmodul. Angebracht sind neun RGB LEDs (1), sechs 5200 K LEDs (2) und sechs 3100 K LEDs (3).

Bei der aktiven Kühlung handelt es sich um Lüfter mit deren Hilfe der hintere Teil der Lichtmodule gekühlt werden kann. Die Lüfter werden über den Mikrocontroller geregelt. Zu diesem Zweck ist auf der Rückseite der Module mittig ein Temperatursensor angebracht. Über den Sensor kann somit die Temperatur überwacht und im eingeschwungenen Zustand mit einer Abweichung von  $\pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  konstant gehalten werden. Um den Farbort der LEDs stabil zu halten, wurde das Lichtmodul der Vergleichskammer stabil bei einem Wert von  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  gehalten. Die Temperatur der Referenzkammer variierte im Verlauf der Untersuchungen. Das führte zu einer leichten Verschiebung des Farbortes der Referenzlichtquellen, wenn die der Aufbau nach einem Versuch aus und wieder eingeschaltet wurde. Da die Lichtspektren der Referenzkammer nicht direkt verändert werden konnten, wurde der Farbort über das Regeln der Temperatur neu eingestellt.

### Reproduzierbarkeit der Farbwerte in der Kammer

Bei dem verwendeten Aufbau stellte sich die automatisierte Regelung bei der Einstellung der Farbkoordinaten der LED-Mischspektren als ein Problem heraus. Sobald sich der Aufbau thermisch stabilisiert hatte, konnten zwar die Farborte mit einer Abweichung von weniger als 0,0005 innerhalb des  $u'v'$ -Farbdiagramm eingestellt werden. Es traten allerdings Abweichungen auf, wenn zwischen den Versuchsdurchläufen Wartezeiten von mehr als 24 Stunden entstanden. Aus diesem Grund wurden die Lichtquellen vor jedem Versuchsdurchlauf vermessen und bei einer eventuellen Abweichung manuell auf die in Tabelle 3 und Tabelle 4 angegebenen Werte eingestellt.



## 3.2 Versuchsablaufbeschreibung

Da für die Untersuchungen Lichtquellen hinsichtlich ihres Farbeindrucks miteinander verglichen werden, wurden im Vorfeld zu den Untersuchungen die Testpersonen mit Hilfe der in 2.2 beschriebenen Ishihara Farbtafeln auf Farbfehlsichtigkeit geprüft. Die Testpersonen haben hierzu 38 verschiedene Farbtafeln bewertet [76]. Bei keiner der Testpersonen wurde Farbfehlsichtigkeit festgestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Lichtquellen paarweise visuell aufeinander abgeglichen. Dabei wird nicht das unmittelbar aus den Leuchtmitteln emittierte Licht verglichen, sondern dessen Reflexion auf einer diffus reflektierenden Fläche. Die prinzipielle Versuchsanordnung ist in den Abbildungen Abbildung 51 und Abbildung 52 zu sehen.

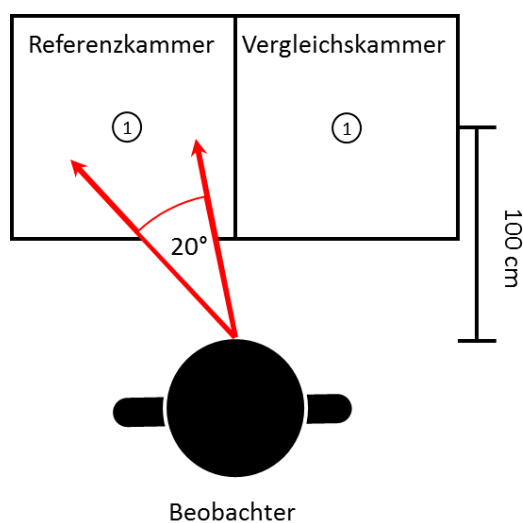


Abbildung 51: Prinzipielle Versuchsanordnung aus der Vogelperspektive. Gemessen ab der Mitte des Aufbaus, befindet sich die Testperson einen Meter von dieser entfernt. Während des Vergleichs betrachtet die Testperson die beiden Kammern abwechselnd.

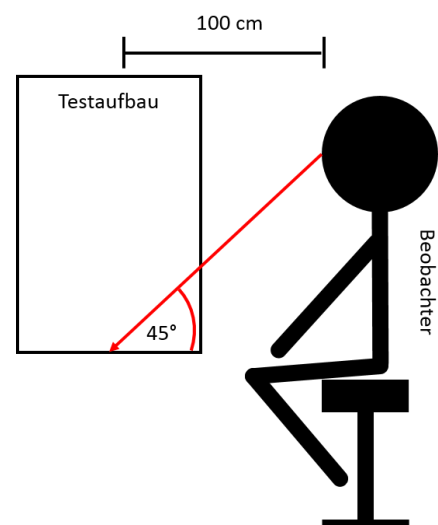


Abbildung 52: Seitenansicht der prinzipiellen Versuchsanordnung. Die Testperson schaut in einem Winkel von 45° auf den Boden der Kammern.

Die Testperson schaut aus einem Winkel von 45° auf die Mitte des Bodens der Referenz- bzw. der Vergleichskammer. Der Proband versucht dabei die gesamte Fläche zu betrachten ohne auf einen bestimmten Punkt auf dem Boden zu fokussieren. Der Abstand der Sehaufgabe (Mitte der Kammern) bis zur vorderen Front der Testperson beträgt einen Meter. Um die Lichtquellen unabhängig voneinander beurteilen zu können, sind die beleuchteten Flächen räumlich voneinander getrennt. Des Weiteren ist die Größe des Sehfeldes mit einem Winkel von 20° so gewählt, dass die Testperson nur eine der beiden Flächen im Blickfeld hat. Vor jedem Versuchsdurchlauf wurde die Helligkeit auf dem Boden der Demo-Box auf eine mittlere Beleuchtungsstärke von 1000 lx eingestellt.

Der Versuchsaufbau ist so konzipiert, dass eine Testperson nicht direkt das emittierte Licht, sondern dessen Reflexion auf einer weißen, diffusen Oberfläche bewertet. Die zu vergleichenden Lichtquellen liefern zwar unterschiedliche Spektren, aber ähnliche Farbtemperaturen und



gleiche Helligkeiten auf den Bodenflächen der beiden Kammern. Die Größe des Sehfeldes ist so gewählt, dass ein Gesichtsfeld von mehr als  $10^\circ$  ausgeleuchtet ist.

Die Trennwand verhindert die Vermischung der Lichtspektren von Referenz- und Vergleichskammer auf der Sehfläche, allerdings wird die Gesichtsfäche des Beobachters von der Reflexion auf dem Kammerboden beleuchtet. Um die Mischadaptation auf der Gesichtsfäche zu reduzieren, schaut die Testperson die zu vergleichenden Felder nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd an, wie in den Abbildungen Abbildung 53 und Abbildung 54 dargestellt ist.

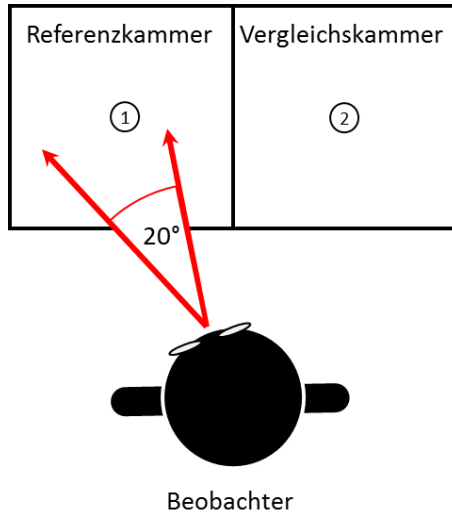


Abbildung 53: Versuchsablauf: Der Proband schaut auf die Referenzfläche 1 und prägt sich den Farbton ein.

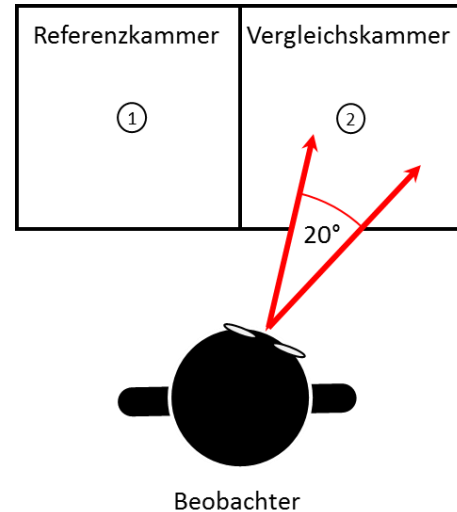


Abbildung 54: Versuchsablauf: Nachdem der Proband sich den Referenzfarbton eingeprägt hat, wechselt er auf die Vergleichsfläche und versucht den Farbton auf dem Farbton der Referenz aus der Erinnerung heraus anzugleichen.

Der Versuchsperson ist es erlaubt den Blick ständig zwischen den beiden Kammern zu wechseln und den Farbton zu ändern, sobald ein Farbtonunterschied wahrgenommen wird. Es ist dabei allerdings nicht erlaubt beide Flächen gleichzeitig im Blickfeld zu haben, da es sonst zu einer Mischadaptation kommt.

Der Farbabgleich wird mit Hilfe eines Xbox Controllers vorgenommen, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben ist. Über das Steuerkreuz wird über die Änderung der Intensitäten der RGB-LEDs der Farbeindruck auf dem Boden der Testkammer eingestellt. Die Steuerung folgt dabei dem  $L^*a^*b^*$  Farbraum. So verschiebt sich z.B. der Farbeindruck beim Drücken des Steuerkreuzes nach oben ins Gelbliche und beim Drücken nach unten ins Bläuliche. Nachdem ein Farbabgleich zwischen Referenz- und Testkammer gefunden wurde, können die Farbwertanteile  $a^*$  und  $b^*$  mit der Taste A gespeichert werden.

Der Versuchsablauf folgt den Schritten wie sie in Abbildung 55 zu sehen sind.

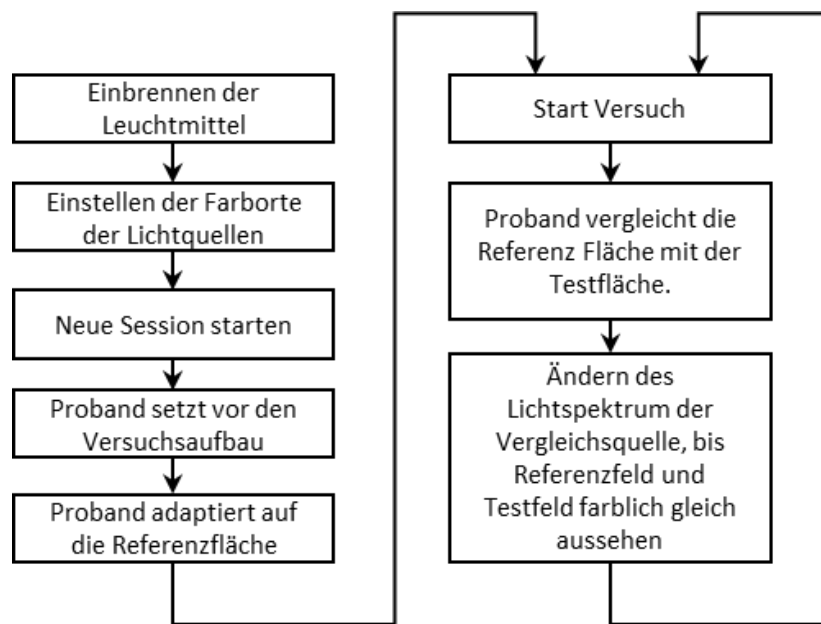


Abbildung 55: Versuchsablauf für den paarweisen Farbabgleich.

Vor jedem Versuch werden die Lichtquellen für zwei Stunden eingebrannt. Nach der Einbrennphase werden die Farborte der Referenzlichtquellen bestimmt und mit den Werten aus den Tabellen Tabelle 3 und Tabelle 4 verglichen. Sollten die gemessenen Werte nicht denen aus den Tabellen entsprechen, werden die Farborte der Referenzlichtquelle über die Veränderung der Temperatur eingestellt.

Nachdem der Farbort der Referenzlichtquelle eingestellt ist, wird der Proband gebeten auf das Referenzfeld zu adaptieren. Der Proband schaut hierzu auf das von den Referenzlichtquellen beleuchtete Feld. Nach Ablauf einer Adaptationsperiode von 10 Minuten beginnt der Versuch.

Für den Abgleich sitzt die Testperson mittig vor dem Testaufbau und betrachtet die Kammerböden unter einem Winkel von 45 Grad. Für den Abgleich kann die Testperson mit Hilfe des in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Controllers die spektralen Anteile der eingebauten LEDs soweit anpassen, bis die Weißtöne der beiden Kammerböden gleich erscheinen. Der Proband wird gebeten das Testspektrum solange zu verändern, bis ein Unterschied zwischen den Kammern zu erkennen ist. Der Versuch wird innerhalb einer Session von den jeweiligen Testpersonen dreimal mit unterschiedlichen Bedingungen wiederholt. Der Proband muss die drei folgenden Unterschiedsstufen nacheinander einstellen:

Erster Durchlauf: Einstellen eines gerade wahrnehmbaren Farbunterschiedes. Die Testperson ist der Meinung einen gerade wahrnehmbaren Farbtonunterschied zwischen den weißen Flächen zu erkennen.

Zweiter Durchlauf: Einstellen eines gerade tolerierbaren Farbunterschiedes. Die Testperson kann einen farblichen Unterschied wahrnehmen, erkennt aber noch an, dass dieser Farbunterschied noch gerade zulässig ist.

Dritter Durchlauf: Einstellen eines nicht mehr tolerierbaren Farbunterschiedes: Die Testperson nimmt einen farblichen Unterschied wahr, der nicht mehr akzeptabel ist. Die beiden Flächen sehen farblich deutlich unterschiedlich aus.

Für jede Farbtemperatur und jedes Testspektrum wurde der Versuch von elf Probanden (zwischen 28 und 35 Jahren) durchgeführt. Für die Abgleiche nahmen nicht immer dieselben Testpersonen teil. Tabelle 5 zeigt welchen Test die jeweiligen Versuchspersonen durchgeführt haben.

Tabelle 5: Zuweisung der jeweiligen Testpersonen zu den Abgleichen für 5200K und 2700K. Das Häkchen (✓) markiert ob die Testperson für die jeweilige Farbtemperatur getestet wurde. Für die Felder die mit einem \* markiert sind, hat die Testperson den Versuch für die entsprechende Farbtemperatur nicht durchgeführt.

	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15
5200K	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	*	*
2700K	✓	*	*	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓

Um die intrapersonelle Streuung mit zu berücksichtigen, hat jede Testperson den Versuch im Durchschnitt viermal für 5200 K und zweimal für 2700 K durchgeführt. Jede Einstellung wurde nach jedem Versuchsablauf spektral vermessen.

---

### 3.3 Messtechnik

---

Das Lichtspektrum wurde mit einem Spektroradiometer vom Typ CS1000A der Firma Konica Minolta aufgenommen, das für Messungen von elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Bereich ausgelegt ist. Die verwendeten Photodioden sind in der Lage im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm mit einer Auflösung von 0,9 nm Wellenlängenintervallen mit einer Abweichung von  $\pm 0,3$  nm zu messen. Für die Bestimmung des Farbortes einer Lichtquelle wird eine Genauigkeit von 0,0002 im xy- Farbraum angegeben.

---

## 4 Laborversuche – Ergebnisse – Analyse

Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem, dass zwei visuell abgegliche Lichtquellen unterschiedliche (instrumentell gemessene) Farbörter haben können. Es werden verschiedene Normspektralwertfunktionen untersucht, die den chromatischen Abstand zwischen der Referenz- und Testlichtquelle minimieren. Hierzu werden sowohl Funktionen betrachtet, welche in der Literatur zu finden sind, als auch einige für diese Arbeit modifizierte Funktionen. Des Weiteren wird ein alternatives Modell vorgestellt, welches davon ausgeht, dass jedes Lichtspektrum mit einer anderen Normspektralwertfunktion bewertet wird, um unabhängig von der Farbtemperatur den Abstand zwischen den Lichtquellen zu minimieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ergebnisse über die DIN99 dargestellt [51], basierend auf dem  $L^*a^*b^*$ -Farbraum [50].

---

### 4.1 Bewertung diverser Spektralwertfunktionen zur Berechnung der Farbabstände

---

#### 4.1.1 Bewertung der Normspektralwertfunktionen anhand der Abstände (interpersonell)

Der Einfluss der Normspektralwertfunktionen dahingehend beurteilt, in wie weit der instrumentelle Abgleich mit Hilfe der Funktionen aus der bereits vorhandenen Literatur mit dem visuellen Abgleich übereinstimmt bzw. wie die Funktionen modifiziert werden müssen, um einen möglichst geringen Farbabstand  $\Delta\bar{E}_{99}$  zwischen visuell abgeglichenen Lichtquellen zu erreichen (siehe Abschnitt 2.3.8).

Es wird in diesem Abschnitt auf einige modifizierte Versionen der Funktionen nach Norm eingegangen, die bereits in 2.3 beschrieben wurden. Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Modifikation der Normspektralwertfunktion von Stockmann zu einer Verbesserung des Abstandes von visuell abgeglichenen Lichtquellen führen kann [54], [55]. Dazu wurde die  $\bar{z}(\lambda)$ -Funktion entlang der Wellenlänge verschoben.

Für diese Arbeit werden die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Normspektralwertfunktionen von 1964, sowie die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ -,  $s_{10}(\lambda)$ -Kurven für das 10° Gesichtsfeld modifiziert. Die Kurven werden von ihrer ursprünglichen Position in 1 nm-Schritten nach links und rechts bis zu einem Maximum von 6 nm verschoben.

Es werden im weiteren Verlauf diverse Lichtspektren bei den Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K visuell aufeinander abgeglichen und im Anschluss instrumentell vermessen. Im Folgenden werden für die jeweiligen Farbabstände zwischen der Referenz und den Testlichtquellen die Abkürzungen aus Tabelle 6 verwendet. Die Bezeichnung  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  steht z.B. für den über die Testpersonen gemittelten Abstand zwischen den Farbörtern der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB-Einstellung nach einem visuellen Abgleich (siehe auch Abschnitt 2.3.8).

Für die Mischung der Lichtspektren auf der Testseite wurden eine Reihe von roten, grünen und blauen LEDs sowie warmweiße und kaltweiße LEDs verwendet (siehe Abschnitt 3.1.2, Abbildungen Abbildung 42 und Abbildung 43). Den Testpersonen war es über dem in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Controller möglich über die Veränderung der Intensitäten der jeweiligen LEDs die Lichtfarbe zu verändern. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung von weißem Licht bei den Farbtemperaturen 2700K und 5200K. Der jeweilige Weißton der Lichtquelle konnte dabei sowohl ausschließlich über die Verwendung der roten, grünen und blauen LEDs eingestellt werden (RGB), was zu einem sehr lückenhaften Lichtspektrum führte, oder über rote, grüne und blaue LEDs mit einer zusätzlichen weißen LED (RGBW). Die Verwendung einer zusätzlichen weißen LED sorgt für ein stärker aufgefülltes Lichtspektrum.

Tabelle 6: Abkürzung der gemittelten Farbabstände zwischen den Referenzen und den jeweiligen RGB- und RGBW-Einstellungen.

$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Gemittelte Abstände zwischen der 5200 K Kompaktleuchtstofflampe und der 5200 K RGB Einstellung unter Verwendung von roten, grünen und blauen LEDs.
$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Gemittelte Abstände zwischen der 5200 K Kompaktleuchtstofflampe und der 5200 K RGBW Einstellung unter Verwendung von roten, grünen und blauen sowie 5200K kaltweißen LEDs.
$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Gemittelte Abstände zwischen der 2700 K Halogenlampe und der 2700 K RGB Einstellung unter Verwendung von roten, grünen und blauen LEDs.
$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Gemittelte Abstände zwischen der 2700 K Halogenlampe und der 2700 K RGBW Einstellung unter Verwendung von roten, grünen und blauen sowie 3000K warmweißen LEDs.

Die gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{99}$  werden zum besseren Verständnis in Form von Balkendiagrammen dargestellt. In den folgenden Balkendiagrammen für beide Farbtemperaturen stellen die vollen Balken den Abstand zwischen der Referenz und der RGB Mischung dar und die gestrichelten Balken repräsentieren den Abstand zwischen der Referenz und der RGBW Mischung. Einer der Schwerpunkte dieser Arbeit ist die Frage, ob die Verwendung alternativer bzw. modifizierter Funktionen im Vergleich zu den Normspektralwertfunktionen eine Verringerung des Abstandes zwischen den Farborten der Referenzlichtquellen und deren jeweiligen Testlichtquellen zur Folge hat. Es werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

- Nullhypothese 1: Je aufgefüllter bzw. ähnlicher das Testspektrum dem Referenzspektrum ist, desto geringer ist auch der Abstand zwischen deren Farborten, d.h. es wird davon ausgegangen, dass der Abstand  $\Delta \bar{E}^{RGB}$  größer sein wird als der Abstand  $\Delta \bar{E}^{RGBW}$ . Es gilt:  $\mu^{RGB} > \mu_0^{RGBW}$ , wobei  $\mu^{RGB}$  dem über die Testpersonen gemittelten Abstand  $\Delta \bar{E}^{RGB}$  entspricht und  $\mu_0^{RGBW}$  dem Abstand  $\Delta \bar{E}^{RGBW}$ . Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst willkürlich von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % ausgegangen.

- Nullhypothese 2: Die Verwendung der Normspektralwertfunktion CIE1964 berechnet den kleinstmöglichen Abstand zwischen den Farbornen. Es gilt:  $\mu_{\text{alternativ}} > \mu_{0\_1964}$ . Hierbei entspricht  $\mu_{\text{alternativ}}$  dem über die Testpersonen gemittelten Abstand unter der Verwendung einer alternativen bzw. modifizierten Spektralwertfunktion (z.B. Spektralwertfunktion um 1 nm verschoben  $\Delta\bar{E}_{\lambda+1\text{nm}}^{\text{RGB}}$ ) und  $\mu_{0\_1964}$  dem gemittelten Abstand unter Verwendung der Normspektralwertfunktion von 1964. Es wird hier vorerst willkürlich von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % ausgegangen.
- Nullhypothese 3: Der Abstand nach einem visuellen Abgleich für die 2700 K Abstände ist geringer als für die 5200 K Abstände. Es gilt:  $\mu_{5200\text{K}} > \mu_{0\_2700\text{K}}$ . Hierbei steht  $\mu_{5200\text{K}}$  für die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGB}}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$ , während die Größe  $\mu_{0\_2700\text{K}}$  steht für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGB}}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGBW}}$ . Es wird wieder von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % ausgegangen.

Jeder Farbabgleich wurde von elf Probanden durchgeführt, wobei die 5200 K Einstellungen vier bis sechsmal wiederholt wurden, die 2700 K Einstellungen ein bis dreimal. Die Farbabstände wurden gemäß den Rechenschritten aus Kapitel 2.3.8 zunächst für jede Testperson individuell gemittelt, bevor sie für alle gemittelt wurden. In den folgenden Kapiteln wird zur Überprüfung der Signifikanz der Einstichproben-t-Test verwendet. Als Maß für die Streuung wird das Konfidenzintervall verwendet, mit einem Konfidenzniveau von 95 %. Eine Tabelle einiger t-Quantile zur Bestimmung der Irrtumswahrscheinlichkeit ist im Anhang zu finden. [Abschnitt B].

#### 4.1.2 Analyse des Farbabstandes unter Verwendung der CIE Normspektralwertfunktionen

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Normspektralwertfunktionen von 1931 für den 2°-Beobachter, von 1964 für den 10°-Beobachter sowie den angepassten Funktionen von Stockmann für den 2°- und 10°-Beobachter (siehe Abschnitt 2.3). Die Funktionen werden anhand der sich ergebenden Farbabstände zwischen den Referenzen mit den Mittelwerten der entsprechenden RGB- und RGBW-Einstellungen verglichen (siehe Abschnitt 2.3.8). Für diesen Abschnitt wird von den bereits bei den Nullhypothesen vorgestellten Annahmen ausgegangen, dass der Abstand  $\Delta\bar{E}^{\text{RGB}}$  zwischen Referenzspektrum und dem reinen RGB-LED-Mischspektrum größer ist als der Abstand  $\Delta\bar{E}^{\text{RGBW}}$  zwischen der Referenz und dem RGBW-Mischspektrum. Des Weiteren wird für diese Arbeit vorausgesetzt, dass die Normspektralwertfunktionen für 2° zu einem größeren Abstand führen als die Funktionen für 10°. Die gemittelten Abstände der 5200K-Einstellungen, sowie die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle sind in Abbildung 56 grafisch dargestellt (siehe auch Abschnitt B für die numerischen Werte).

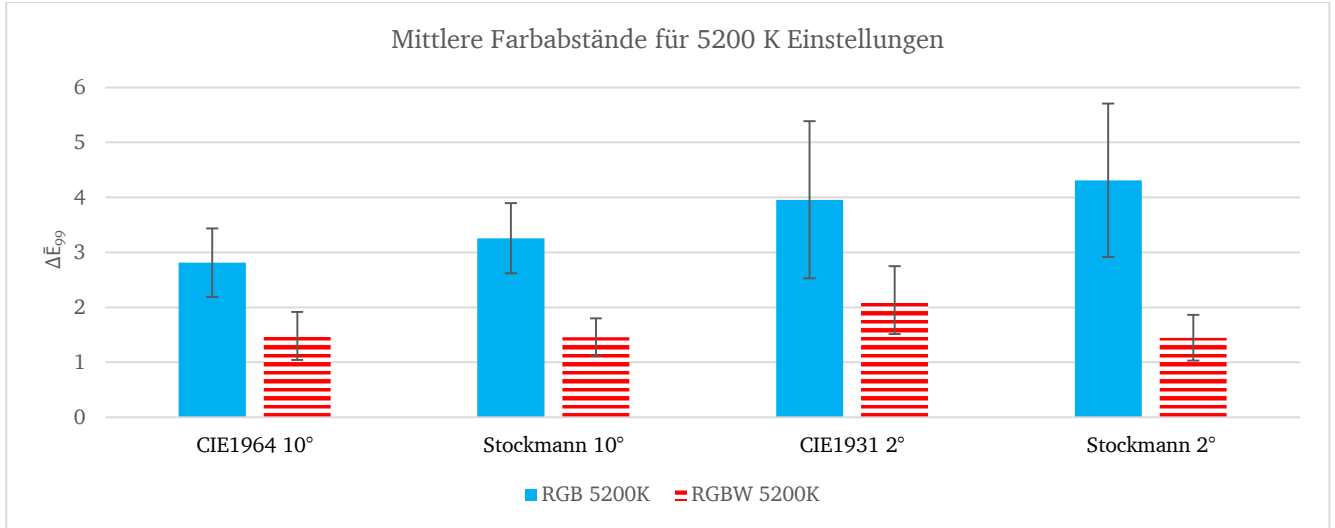


Abbildung 56: Gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{99}$  zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

Die entsprechenden Prüfwerte  $t$  der Nullhypothesen sind in Tabelle 7 aufgelistet. Für die Nullhypothese 2 ( $\mu_{\text{alternativ}} > \mu_{0\_1964}$ ) wird als Vergleichsgröße  $\mu$  der gemittelte Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGB}}$  bzw.  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGBW}}$  verwendet, berechnet mit der Normspektralwertfunktion von 1964.

Tabelle 7: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ). Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

	$\mu_{5200K}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_5200K}^{\text{RGBW}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$
CIE1964	4,7		
Stockmann 10°	6,2	1,55	0,12
CIE1931	2,7	1,78	2,36
Stockmann 2°	4,6	2,39	0,169

Abbildung 56 zeigt, dass für die Normspektralwertfunktion CIE1931 und Stockmann 2° die 95 % Konfidenzintervalle für die mittleren Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGB}}$  sehr viel größer sind als für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGBW}}$ . Für die Normspektralwertfunktion CIE1964 und Stockmann 10° sind die Unterschiede zwischen den Konfidenzintervallen der Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGB}}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGBW}}$  dagegen nur geringfügig größer.

Anhand der Balken ist klar erkennbar, dass der mittlere Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGB}}$ , unabhängig von der verwendeten Normspektralwertfunktion, größer ist als  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{\text{RGBW}}$ .

Die Nullhypothese 1 ( $\mu_{5200K}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_5200K}^{\text{RGBW}}$ ) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen. Allerdings gilt zu beachten, dass die Verwendung der Normspektralwertfunktion von 1931 einen Prüfwert  $t$  ergibt, der nah an dem  $t(0,975;10)$ -Quantil liegt. Daher besteht eine geringe, aber vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese für diesen Fall abge-



---

lehnt wird. Die verringerte Wahrscheinlichkeit wird möglicherweise durch die Überschneidung der Konfidenzintervalle der Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  verursacht.

Die Verwendung der Normspektralwertfunktion 1964 sowie die Spektralwertfunktion Stockmann für 10° liefert im Vergleich zu den anderen Einstellungen den kleinsten Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ , während die Abstände für die Spektralwertfunktionen Stockmann 2° und CIE1931 mit einem Wert von mehr als 1 über dem Wert der CIE1964-Funktion liegen.

Für die RGB-Einstellung wird die Nullhypothese 2 ( $\mu_{\text{alternativ}_5200K}^{RGB} > \mu_{0_1964_5200K}^{RGB}$ ) mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % angenommen, d.h. die Verwendung der übrigen Normspektralwertfunktionen führt zu einer Vergrößerung des mittleren Abstandes  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ .

Für die 2° Funktionen, Stockmann und CIE1931 ergeben sich folgende Ergebnisse. Bei der Verwendung der CIE1931-Funktion anstelle der CIE1964-Funktion ergibt sich hier zum Beispiel ein größerer Unterschied zwischen den Abständen  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . Allerdings wird aufgrund der Streuung bei der CIE1931-Funktion das Konfidenzintervall der CIE1964-Funktion vom Konfidenzintervall der CIE1931-Funktion fast vollständig eingeschlossen, wie sich am Diagramm in Abbildung 56 zeigt. Die Ablehnung der Nullhypothese 2 ist in diesem Fall deswegen kritisch, da die Normspektralwertfunktion CIE1931 eigentlich für ein 2° Gesichtsfeld ausgelegt ist, da der Farbabstand aufgrund der Sehaufgabe größer sein sollte. Bei der Verwendung der Normspektralwertfunktion von Stockmann 2° anstelle der CIE1964 kommt es dagegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zu einer Vergrößerung des mittleren Abstandes  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ .

Des Weiteren zeigt Abbildung 56, dass die Normspektralwertfunktionen CIE1964, Stockmann 10° und 2° vergleichbare Werte für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  liefern. Nur die Funktion CIE1931 berechnet sowohl einen größeren Abstand, als auch eine größere Streuung des 95 % Konfidenzintervalls im Gegensatz zu den anderen Funktionen.

Für die RGBW-Einstellung wird die Nullhypothese 2 für die Normspektralwertfunktionen von Stockmann 2° und 10° mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt (Tabelle 7), denn die Spektralwertfunktionen von Stockmann 2° und 10° berechnen ähnlich große Abstände wie die Normspektralwertfunktion CIE1964. Außerdem zeigt die Abbildung, dass aufgrund der großen Streuung der individuellen Ergebnisse sich die Konfidenzintervalle überlagern. Die Ablehnung der Stockmann 2° Funktion ist auch in diesem Fall kritisch, da diese eigentlich für ein 2° Gesichtsfeld ausgelegt ist, aber einen genauso geringen bzw. großen Farbabstand berechnet wie die Funktionen, die für ein 10° Gesichtsfeld ausgelegt sind. Aufgrund der hohen Irrtumswahrscheinlichkeit ( $\alpha = 10\%$ ) ist die Nullhypothese somit statistisch nur schwach gesichert.

Die gemittelten Abstände zwischen der 2700 K-Referenz und den dazugehörigen Einstellungen, sowie die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle, sind in Abbildung 57 grafisch dargestellt und im Anhang (Abschnitt B) in numerischer Form aufgelistet.



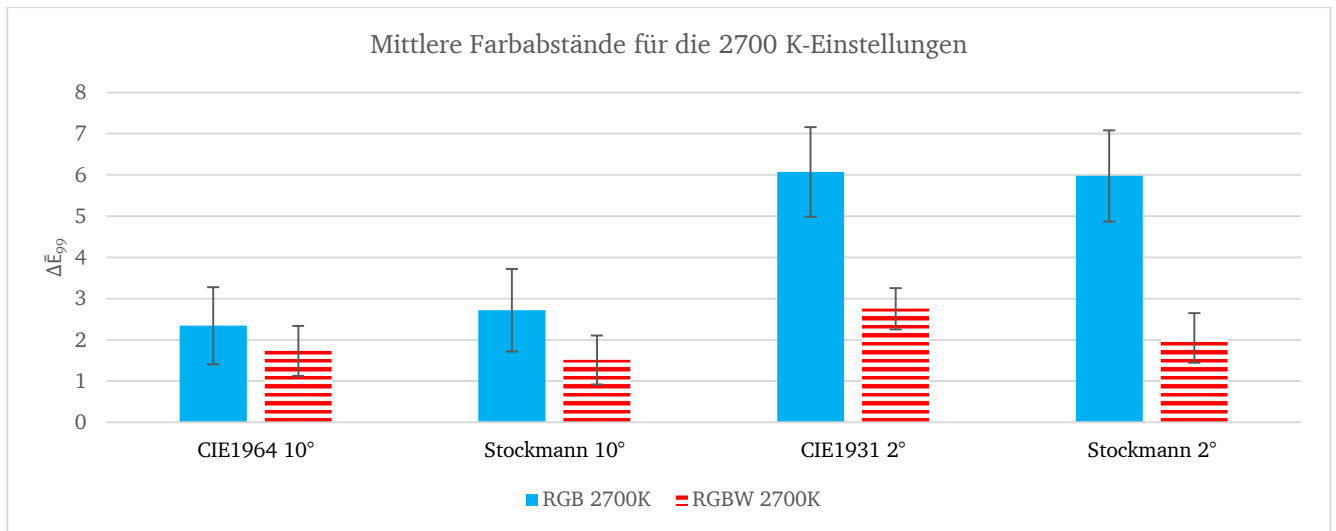


Abbildung 57: Gemittelte Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

Die entsprechenden Prüfwerte  $t$  der Nullhypothesen sind für die vier Normspektralwertfunktionen in der Tabelle 8 aufgelistet. Für die Nullhypothese 2 wird als Vergleichsgröße  $\mu$  der gemittelte Abstand verwendet, berechnet mit der Normspektralwertfunktion von 1964.

Tabelle 8: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ). Für  $H_0: \mu_{alternativ,2700K}^{RGB} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{alternativ,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

	$\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$	$\mu_{alternativ,2700K}^{RGB} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGB}$	$\mu_{alternativ,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGBW}$
CIE1964	1,9		
Stockmann 10°	3	0,8	0,6
CIE1931	7,2	7,6	3,9
Stockmann 2°	8,3	7,3	0,9

Die Streuung der 95 % Konfidenzintervalle für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  ist im Allgemeinen größer als für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  (Abbildung 57). Unabhängig von der verwendeten Normspektralwertfunktion ist bei den verschiedenen Einstellungen der gemittelte Abstand  $\Delta\bar{E}_{RGB\ 2700K}$  größer als  $\Delta\bar{E}_{RGBW\ 2700K}$ .

Zusammenfassend ergeben sich für die Nullhypothese 1 folgende Aussage. Die Nullhypothese 1 ( $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$ ) wird für die CIE1964 Funktion, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt, was mit der Überlappung der Konfidenzintervalle zusammenhängen kann. Wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit auf 10% angehoben wird, wird auch die Nullhypothese angenommen.

Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen dem Prüfwert  $t$  und dem  $t(0,975;10)$ -Quantil könnte für die CIE1964 Funktion dennoch die Nullhypothese 1 angenommen werden. Für die Normspektralwertfunktion CIE1931 kann die Nullhypothese 1 zwar angenommen werden, al-

---

lerdings liegt der Prüfwert  $t$  nahe an dem  $t(0,975;10)$ -Quantil, wodurch die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Hypothese noch abgelehnt werden könnte. Auch in diesem Fall kann dies mit der starken Überlappung der Konfidenzintervalle zusammenhängen.

Mit der Nullhypothese 1 können nun folgende Aussagen für die Farbabstände getroffen werden (Abbildung 57). Unter Verwendung der Normspektralwertfunktion CIE1964 ist der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  zum Beispiel am geringsten. Die Spektralwertfunktion Stockmann  $10^\circ$  liefert im Vergleich dazu einen geringfügig größeren Wert. Die Normspektralwertfunktionen für  $2^\circ$  berechnen einen Abstand, der fast doppelt so groß ist wie für die  $10^\circ$  Funktionen. Die Überprüfung der Nullhypothese 1 ergibt somit, dass die beiden Normspektralwertfunktionen, CIE1931 und Stockmann  $2^\circ$ , mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen werden. Aus den  $t$ -Werten aus Tabelle 8 wird ersichtlich, dass die Hypothese auch bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.1% noch angenommen werden kann. Damit ergeben sich für den gemittelten Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  die Normspektralwertfunktionen CIE1964, Stockmann  $10^\circ$  und  $2^\circ$  vergleichbare Abstände und 95 % Konfidenzintervalle. Die CIE1931- Funktion errechnet den größten Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

Für die RGB-Einstellung kann die Nullhypothese 2 bei der Verwendung der Spektralwertfunktion Stockmann  $10^\circ$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt werden (Tabelle 8). Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Funktion CIE1964 einen geringeren Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  als die Funktion Stockmann  $10^\circ$  ergibt. Für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  unter Verwendung der Funktionen für  $2^\circ$  wird die Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % angenommen. Für die beiden Funktionen Stockmann  $2^\circ$  und CIE1931 könnte aufgrund des hohen Prüfwertes  $t$  das Signifikanzniveau auf 1 % gesenkt werden.

Für die RGBW-Einstellung wird die Nullhypothese 2 (Tabelle 8) unter Anwendung der Stockmann  $10^\circ$ -Funktion mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % auch abgelehnt. Der Grund für die Ablehnung besteht zum einen in einem vergleichbar großen Abstand und zum anderen in der Überlagerung der Konfidenzintervalle der Funktionen CIE1964 und Stockmann  $10^\circ$ . Unter Verwendung der Normspektralwertfunktion Stockmann  $2^\circ$  und der CIE1931 wird die Nullhypothese zum Signifikanzniveau 10 % abgelehnt, da die Funktionen eigentlich für ein  $2^\circ$  Gesichtsfeld ausgelegt sind. Bei Verwendung der CIE1931- Funktion kann die Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % angenommen werden. Aufgrund des hohen Unterschiedes des Prüfwertes  $t$  zum  $t(0,9;10)$ -Quantil könnte das Signifikanzniveau auf 0,5 % gesenkt werden, bevor die Nullhypothese 2 abgelehnt wird.

Im folgenden Abschnitt wird auf Nullhypothese 3 eingegangen. Es wird analysiert, ob für die beiden Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K tendenziell vergleichbare Farbabstände berechnet werden (Nullhypothese 3,  $\mu_{5200K} > \mu_{0,2700K}$ ). Abbildung 58 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit den entsprechenden 95 %-Konfidenzintervallen. In Tabelle 9 sind die jeweiligen Prüfwerte  $t$  für die Abstände aufgelistet.

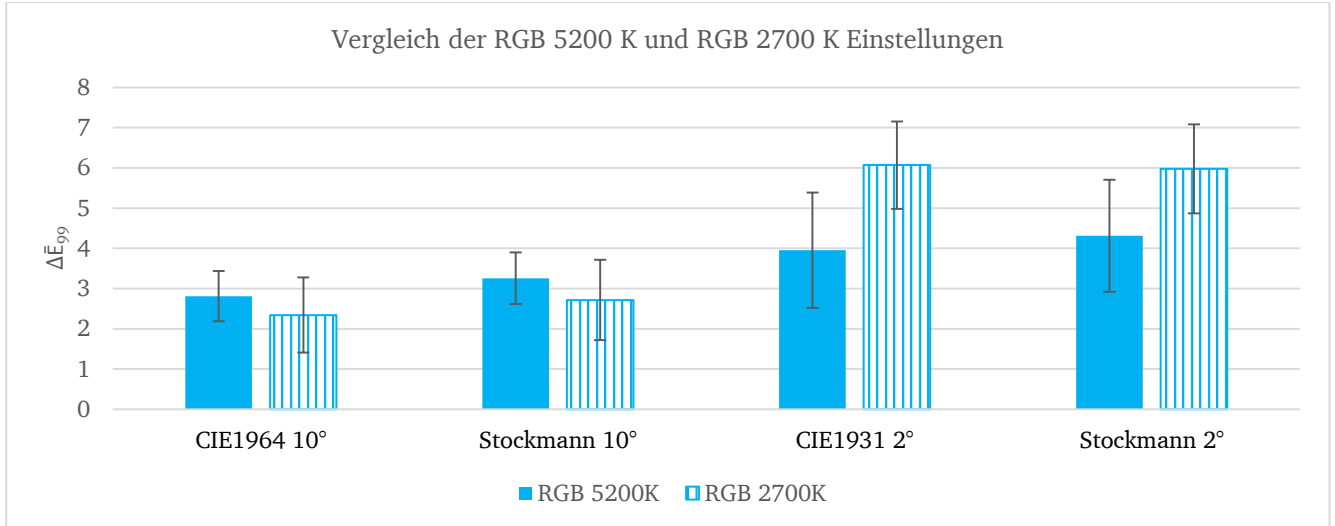


Abbildung 58: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt.

Tabelle 9: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests gemäß der Nullhypothese  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$  für die Abstände der 2700 K Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$  bzw.  $t(0,025;10) = -2,228$ ).

	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$
CIE1964	1,8
Stockmann 10°	2,0
CIE1931	-3,4
Stockmann 2°	-2,8

Die Konfidenzintervalle der Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind unter Verwendung der 10° Normspektralwertfunktionen geringer als bei den 2°-Funktionen (Abbildung 58). Die Konfidenzintervalle für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sind dagegen für alle Normspektralwertfunktionen ähnlich groß.

Die Funktionen CIE1964 und Stockmann 10° ergeben für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größere Werte als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , während unter Verwendung der 2° Normspektralwertfunktionen die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  um etwa ein Drittel kleiner sind als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .

Die Nullhypothese 3 ( $\mu_{5200K} > \mu_{0,2700K}$ ) wird für die Spektralwertfunktionen CIE1964 und Stockmann 10° mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Mögliche Ursachen für die Ablehnung sind der geringe Unterschied zwischen den gemittelten Werten und die starke Überlappung der Konfidenzintervalle. Wegen der Überlappung kann nämlich nicht davon ausgegangen werden, dass die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer sind als die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Für die 2° Normspektralwertfunktionen wird die Nullhypothese 3 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % aufgrund der im Vergleich größeren gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  auch abgelehnt.

Abbildung 59 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit den entsprechenden 95 % Konfidenzintervallen. In Tabelle 10 sind die jeweiligen Prüfwerte t für die Abstände aufgelistet.

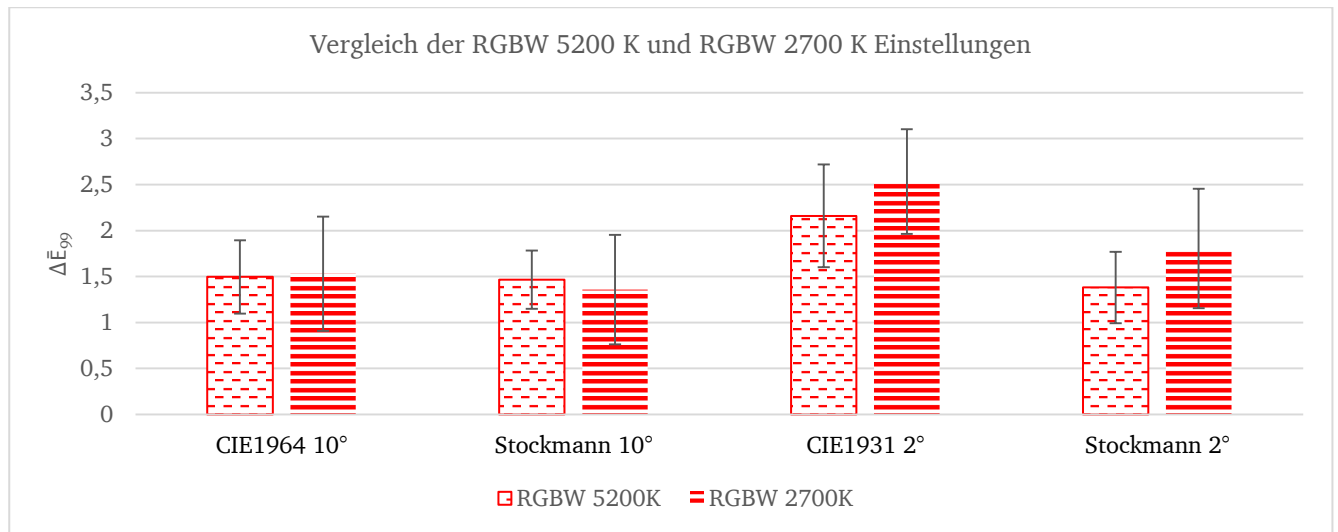


Abbildung 59: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

Tabelle 10: Prüfwerte t des Einstichproben-tests gemäß der Nullhypothese 3  $\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  für die Abstände der 2700 K Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$  bzw.  $t(0,025;10) = -2,228$ ).

	$\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
CIE1964	-0,2
Stockmann 10°	0,8
CIE1931	-1,5
Stockmann 2°	-2,5

Mit Ausnahme der Normspektralwertfunktion von 1931 sind die Konfidenzintervalle für  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  um etwa ein Drittel kleiner als für  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  (Abbildung 59). Die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  haben für die 10° Normspektralwertfunktionen vergleichbar große Werte. Für die 2° Normspektralwertfunktionen sind die mittleren  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  Abstände tendenziell kleiner als für  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Die Nullhypothese 3 ( $\mu_{5200K} > \mu_{0,2700K}$ ) wird daher für alle Normspektralwertfunktionen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt.

Aus den bisherigen Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Für beide Farbtemperaturen sind die mittleren Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  (Abbildung 58) größer als für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  (Abbildung 59). Für die 5200 K-Einstellungen ist der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  unabhängig von der verwendeten Normspektralwertfunktion, mit einer

Wahrscheinlichkeit von 99 % größer als der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Für die 2700K-Einstellungen ist der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  für alle Normspektralwertfunktionen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % größer als der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Des Weiteren kann man allgemein davon ausgehen, dass unter Verwendung der Stockmann 10° Funktionen ähnliche Abstände berechnet werden wie durch die CIE1964 Funktionen, wobei die Normspektralwertfunktion CIE1964 den geringsten Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  berechnet, während die 2° Funktionen größere Abstände ergeben. Allerdings kann für die RGBW-Einstellungen, sowohl für 5200 K, als auch für 2700 K, bei dem Vergleich der Normspektralwertfunktion CIE1964 mit den Funktionen Stockmann 10° und 2° keine statistisch gesicherte Aussage darüber getroffen werden, welche der drei Funktionen den geringsten mittleren Abstand berechnet. Nur die Verwendung der Normspektralwertfunktion CIE1931 führt für beide Farbtemperaturen zu einer signifikanten Vergrößerung des Abstands  $\Delta\bar{E}^{RGBW}$ . Bei dem Vergleich der beiden Farbtemperaturen ergibt sich außerdem sowohl für die RGB- als auch RGBW-Einstellungen, dass die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  kleiner oder gleich sind als die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .

#### 4.1.3 Analyse des Farbabstandes unter der Verwendung von individuellen Normspektralwertfunktionen

Im folgenden Abschnitt werden die Abgleichungen mit den Funktionen der Testpersonen von Stiles und Burch [41] miteinander verglichen. Es wird nach einer Funktion gesucht, unter deren Verwendung sich für beide Farbtemperaturen ein geringerer gemittelter Abstand zwischen den Referenzen und den RGB- und RGBW-Einstellungen ergibt als beim Einsatz der Normspektralfunktion CIE1964. Abbildung 60 zeigt die Normspektralwertfunktionen von 1964 im Vergleich zu zwei individuell aufgenommenen Spektralwertfunktionen.

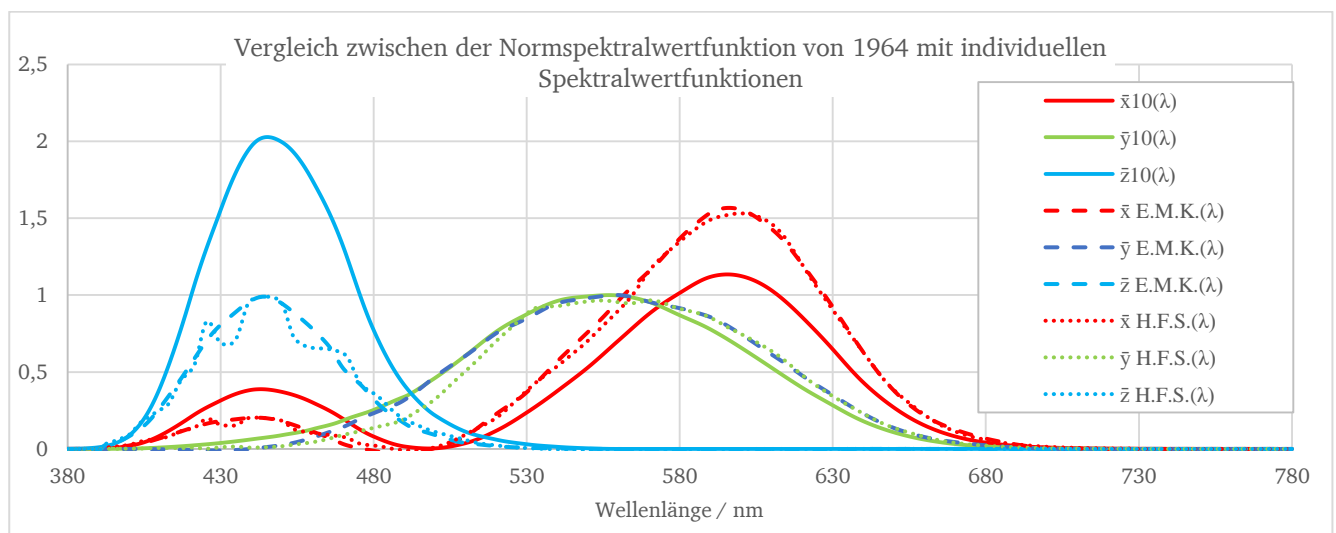


Abbildung 60: Standardisierte Normspektralwertfunktionen von 1964 (durchgezogene Linien) sowie die Empfindlichkeitskurven (gestrichelt und gepunktet) zweier Testpersonen (E.M.K. und H.F.S.) aus den Versuchen von Stiles und Burch [41].

Die Amplituden der individuellen Funktionen können sich stellenweise von den CIE Normspektralwertfunktionen unterscheiden. Die größten Unterschiede sind bei den Amplituden der Kurven der Blau- und Rotempfindlichkeit zu finden. Die Amplitude der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$  Kurve ist zum Beispiel wesentlich kleiner als die der  $\bar{x}_{E.M.K}(\lambda)$  und  $\bar{x}_{H.F.S}(\lambda)$  Kurven, während die Amplitude der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  Kurve größer als für die  $\bar{z}_{E.M.K}(\lambda)$  und  $\bar{z}_{H.F.S}(\lambda)$  Kurven ist. Die Kurven für die Grünempfindlichkeit dagegen unterscheiden sich nur stellenweise. Die Amplitude bleibt bei den  $\bar{y}$ -Kurven größtenteils unverändert. Die auffälligste Änderung ist, dass im Vergleich zu der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  Kurve die  $\bar{y}_{E.M.K}(\lambda)$  und  $\bar{y}_{H.F.S}(\lambda)$  Kurven entlang der Wellenlänge nach rechts verschoben sind.

Unter Verwendung der in dem Kapitel 2.3.8 beschriebenen Formeln wird untersucht, wie sich die einzelnen Empfindlichkeitsfunktionen der Testpersonen aus den Versuchen von Stiles und Burch auf den Farbabstand zwischen den Koordinaten der Referenzlichtquellen und den gemittelten Koordinaten ihrer entsprechenden RGB- und RGBW-Einstellungen auswirken. Hierfür werden die mittleren Abstände der elf Testpersonen für jede der individuellen Funktionen berechnet. Es wird von den Nullhypothesen 1 bis 3 ausgegangen, dass der Abstand  $\Delta\bar{E}^{RGB}$  größer ist als der Abstand  $\Delta\bar{E}^{RGBW}$ , dass die Verwendung der Normspektralwertfunktion CIE1964 den kleinstmöglichen Abstand zwischen den Farbörtern berechnet und dass der Abstand nach einem visuellen Abgleich für die 2700 K Abstände geringer ist als für die 5200 K Abstände. Außerdem wird von einem 95 % Konfidenzintervall und 10 Freiheitsgraden ausgegangen.

Abbildung 61 zeigt einige ausgewählte Abstände zwischen den Koordinaten der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- und RGBW-Einstellungen, sowie die entsprechenden 95 % Konfidenzintervalle. Die Auswahl betrifft die individuellen Funktionen, die zwischen der Referenz und den jeweiligen Einstellungen einen kleineren mittleren Abstand  $\Delta\bar{E}_{99}$  berechnen als die Normspektralwertfunktion CIE1964.

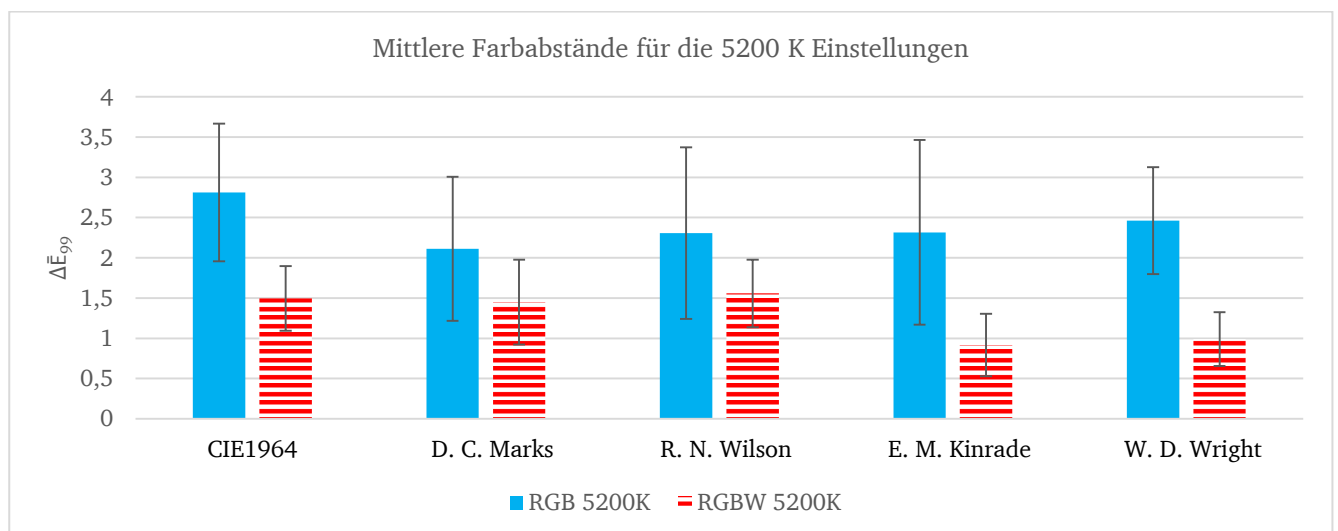


Abbildung 61: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt. Die Farbkoordinaten werden unter Verwendung der unterschiedlichen Empfindlichkeitsfunktionen der Testpersonen aus den Versuchen von Stiles und Burch berechnet.

Die entsprechenden Prüfwerte  $t$  der Nullhypothesen ( $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_5200K}^{RGBW}$  und  $\mu_{alternativ} > \mu_{0\_1964}$ ) sind in Tabelle 11 aufgelistet. Für die Nullhypothese  $\mu_{alternativ} > \mu_{0\_1964}$  wird der gemittelte Abstand verwendet, der als Vergleichsgröße  $\mu$  dient. Verwendet wird die Normspektralwertfunktion von 1964.

Tabelle 11: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests gemäß der Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ). Für  $H_0: \mu_{alternativ\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{alternativ\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10% ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ , bzw.  $-t(0,1;10) = -1,372$ ).

	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_5200K}^{RGBW}$	$\mu_{alternativ\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$	$\mu_{alternativ\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGBW}$
D.C. Marks	1,7	-1,8	0,26
R.N. Wilson	1,3	0,92	0,36
E.M. Kinrade	2,8	0,99	-2,95
W.D. Wright	2,7	0,65	-2,77

Abbildung 61 zeigt für alle Funktionen größere Konfidenzintervalle für Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  als für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Auch für die gemittelten Abstände gilt, dass  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer als  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ .

Die Nullhypothese 1 ( $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_5200K}^{RGBW}$ ) wird für die Spektralwertfunktionen von D.C.Marks und R.N.Wilson mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Aufgrund der starken Überlappung der Konfidenzintervalle kann man nicht davon ausgehen, dass  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  kleiner ist als  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . Für die Funktionen von W.D.Wright und E.M.Kinrade kann die Nullhypothese allerdings angenommen werden.

Des Weiteren kann der Abbildung 61 entnommen werden, dass die gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  für die individuellen Spektralwertfunktionen kleiner sind als für die Normspektralwertfunktion CIE1964. Für die RGB-Einstellung wird daher die Nullhypothese 2 ( $\mu_{alternativ\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$ ) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt (Tabelle 11).

Bei den gemittelten Abständen  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  verhält es sich ähnlich. Die Funktionen von D.C.Marks und R.N.Wilson ergeben vergleichbar große Abstände wie die Normspektralwertfunktion CIE1964, während die Spektralwertfunktionen von E.M.Kinrade und W.D.Wright kleinere Abstände liefern. Daraus folgt, dass für die RGBW-Einstellung die Nullhypothese 2 ( $\mu_{alternativ\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGBW}$ ) bei D.C.Marks und R.N.Wilson mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt wird. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für die RGB-Einstellungen wird hier aber für die Spektralwertfunktionen von W.D.Wright und E.M.Kinrade die Nullhypothese abgelehnt.

Im Folgenden wird darauf eingegangen, ob die individuellen Spektralfunktionen, die zur Berechnung der Koordinaten der 5200 K-Einstellungen verwendet werden, für die 2700 K-



Einstellung vergleichbare Ergebnisse liefern. Abbildung 62 zeigt die über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Koordinaten der 2700 K-Referenz und den 2700 K RGB- und RGBW-Einstellungen, sowie die jeweiligen 95 %-Konfidenzintervalle unter Verwendung der Spektralwertfunktionen von D.C.Marks, R.N.Wilson, E.M.Kinrade und W.D.Wright.

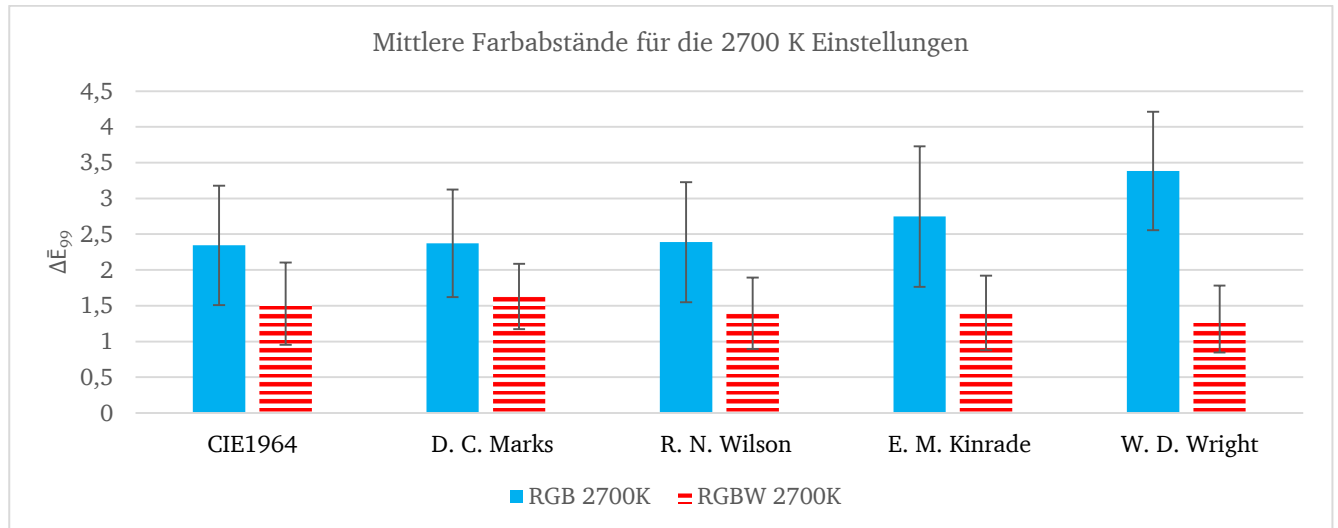


Abbildung 62: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K-Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt. Die Farbkoordinaten wurden unter Verwendung der unterschiedlichen Empfindlichkeitsfunktionen der Testpersonen aus den Versuchen von Stiles und Burch berechnet.

Die entsprechenden Prüfwerte  $t$  der beiden Nullhypothesen  $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  und  $\mu_{alternativ} > \mu_{0,1964}$  für die vier individuellen Spektralwertfunktionen sind in Tabelle 12 aufgelistet. Für die Nullhypothese 2 ( $\mu_{alternativ} > \mu_{0,1964}$ ) wird der unter Verwendung der Normspektralwertfunktion von 1964 berechnete, gemittelte Abstand als Vergleichsgröße  $\mu$  verwendet.

Tabelle 12: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests gemäß der Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ). Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{alternativ,2700K}^{RGB} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{alternativ,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

	$\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$	$\mu_{alternativ,2700K}^{RGB} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGB}$	$\mu_{alternativ,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,1964,2700K}^{RGBW}$
D.C. Marks	1,5	0,05	0,36
R.N. Wilson	2,7	0,12	0,51
E.M. Kinrade	3,5	1	0,57
W.D. Wright	4,6	2,35	0,92

Gemäß der Abbildung 62 sind die mittleren Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  größer als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Die Nullhypothese 1 ( $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$ ) wird unter Verwendung der Spektralwertfunktion von D.C.Marks mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Für die Spektralwert-



funktionen von R.N.Wilson, E.M.Kinrade und W.D.Wright wird die Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen.

Man kann der Abbildung 62 entnehmen, dass die Spektralwertfunktionen von D.C.Marks und R.N.Wilson für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  vergleichbar große Werte ergeben wie für die Normspektralwertfunktion CIE1964. Die Abstände von E.M.Kinrade und W.D.Wright sind dagegen für die 2700 K-Abstände eindeutig größer als die Abstände, die mit der CIE1964 Normspektralwertfunktion berechnet werden.

Für die RGB 2700 K-Einstellung wird die Nullhypothese 2 für die Spektralwertfunktionen von D.C.Marks, R.N.Wilson und E.M.Kinrade mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt, d.h. diese Funktionen berechnen einen kleineren Abstand als die Normspektralwertfunktion CIE1964. Nur für die Funktion von W.D.Wright wird die Nullhypothese angenommen.

Für die RGBW 2700 K-Einstellung wird die Nullhypothese 2 für alle individuellen Spektralwertfunktionen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 10\%$  abgelehnt. Der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  ist bei der Verwendung der individuellen Spektralwertfunktionen entweder kleiner oder gleich groß wie der Abstand, der über die Normspektralwertfunktion CIE1964 berechnet wird.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der 5200 K-Einstellungen mit denen der 2700 K-Einstellungen verglichen. Mit der Nullhypothese 3 ( $\mu_{5200K} > \mu_{0,2700K}$ ) wird überprüft, ob für die beiden Farbtemperaturen tendenziell vergleichbare Abstände  $\Delta\bar{E}_{99}$  berechnet werden. Abbildung 63 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit den entsprechenden 95 %-Konfidenzintervallen. In Tabelle 13 sind die jeweiligen Prüfwerte t für die Abstände aufgelistet.

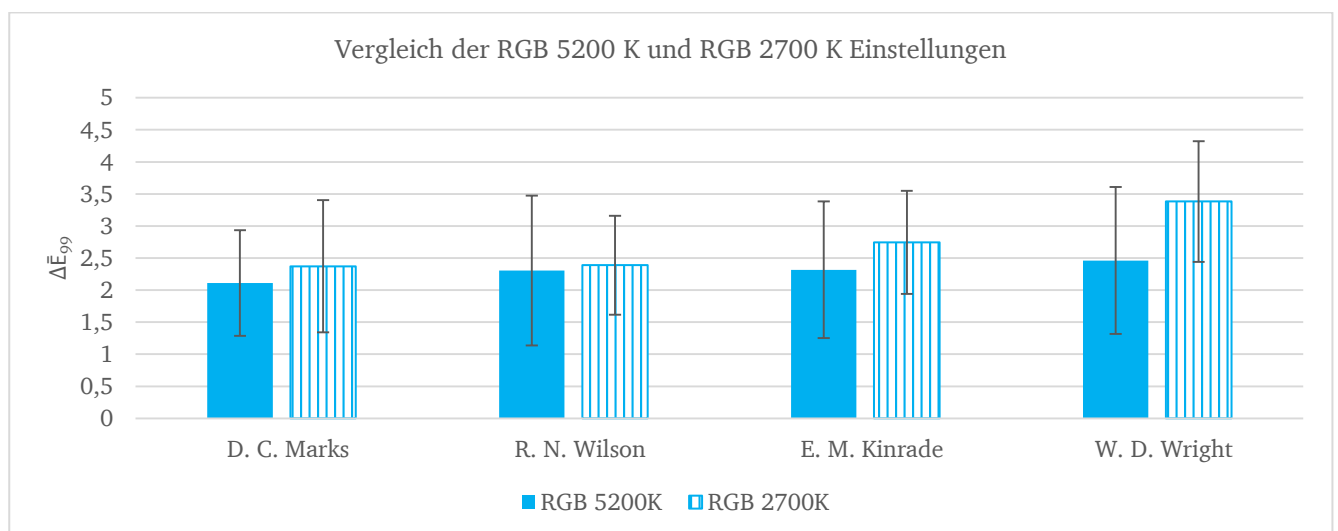


Abbildung 63: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt. Berechnet sind die Abstände über die individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch.

Tabelle 13: Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests gemäß der Nullhypothese 3  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{2700K}^{RGB}$ . Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$  bzw.  $t(0,025;10) = -2,228$ ).

	$\mu_{RGB\ 5200K} > \mu_{0\_RGB\ 2700K}$
D.C. Marks	-0,7
R.N. Wilson	-0,2
E.M. Kinrade	-0,9
W.D. Wright	-1,8

Mit Ausnahme der Funktion von D.C.Marks sind die 95 %-Konfidenzintervalle der gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer als für  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  (Abbildung 63). Des Weiteren sind die gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  kleiner als die Abstände  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , wobei bei der Spektralwertfunktion von W.D.Wright der Unterschied etwas größer ist. Die Nullhypothese 3 wird für alle Spektralwertfunktionen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt.

Abbildung 64 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit den entsprechenden 95 %-Konfidenzintervallen. In Tabelle 14 sind die jeweiligen Prüfwerte  $t$  für die Abstände aufgelistet.

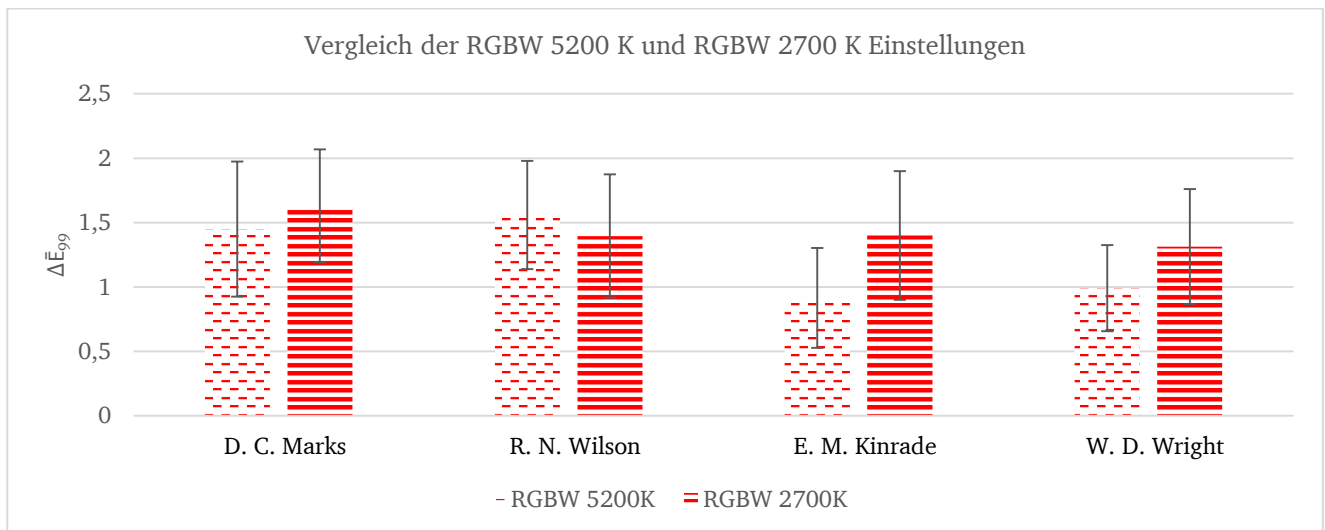


Abbildung 64: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt. Berechnet sind die Abstände über die individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch.

Tabelle 14: Prüfwerte  $t$  des Einstichproben-tests gemäß der Nullhypothese 3  $\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  für die Abstände der 2700 K Einstellungen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$  bzw.  $t(0,025;10) = -2,228$ ).

	$\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
D.C. Marks	-1,1
R.N. Wilson	1,0
E.M. Kinrade	-2,6
W.D. Wright	-1,9

Die 95 %- Konfidenzintervalle sind für die verschiedenen Abstände vergleichbar groß, während unter Verwendung der individuellen Spektralwertfunktionen der gemittelte Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  im Allgemeinen kleiner ist als  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , mit Ausnahme von der Funktion von R.N.Wilson. Nur bei der Anwendung der Spektralwertfunktion von R.N.Wilson ist der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  etwas größer als  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Die Nullhypothese 3 wird für alle Spektralwertfunktionen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt, d.h. die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  sind kleiner oder gleich groß im Vergleich zu  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

Die Ergebnisse aus diesem Abschnitt zeigen, dass sich die individuellen Spektralwertfunktionen bei den 5200 K-Einstellungen im Vergleich zu der Normspektralwertfunktion CIE1964 die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  (Abbildung 63) und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  (Abbildung 64) verringert haben. Die Anwendung der Normspektralwertfunktion auf die 2700 K-Einstellungen resultiert mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % in einer Vergrößerung der Abstände  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Beim Vergleich der individuellen Spektralwertfunktionen mit der Normspektralwertfunktion CIE1964 ergibt sich des Weiteren, dass die mittleren Abstände für die beiden Farbtemperaturen und die RGB- bzw. RGBW-Einstellung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % kleiner werden, bzw. gleich bleiben. Die Spektralwertfunktion von W.D.Wright, die für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit einer Signifikanz von 10 % zu einer Vergrößerung des Abstands gegenüber  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  führt, bildet hierbei eine Ausnahme. Ein Vergleich der beiden Farbtemperaturen zeigt mit einer 97,5 %-Wahrscheinlichkeit, dass die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  kleiner oder gleich sind als die Abstände  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

#### 4.1.4 Farbabstand unter Verwendung von modifizierten $\bar{x}_{10}(\lambda)$ , $\bar{y}_{10}(\lambda)$ , $\bar{z}_{10}(\lambda)$ Normspektralwertfunktionen

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Einfluss des Genotyps (Siehe auch Abschnitt 2.2 und [73] [74] [75]) auf die Bewertung des Farbabstandes. Schanda hat bereits Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt [55]. Er verschob die  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurve der Funktion von Stockmann

zu den kürzeren Wellenlängen hin, was zur Verbesserung des Farbstandes führte. Auf der Basis von diesen Erkenntnissen wird für diese Arbeit die Normspektralwertfunktion von CIE1964 modifiziert. Die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktionen werden hierbei zusammen, aber auch, wie in Abbildung 65 zu sehen, einzeln in 1 nm-Schritten nach links und rechts von ihrer ursprünglichen Position bis zu einem Maximum von 6 nm verschoben (z.B.  $\bar{x}_{10}(\lambda)_{\text{mod}} = \bar{x}_{10}(\lambda + \lambda_{\text{verschoben}})$ ).

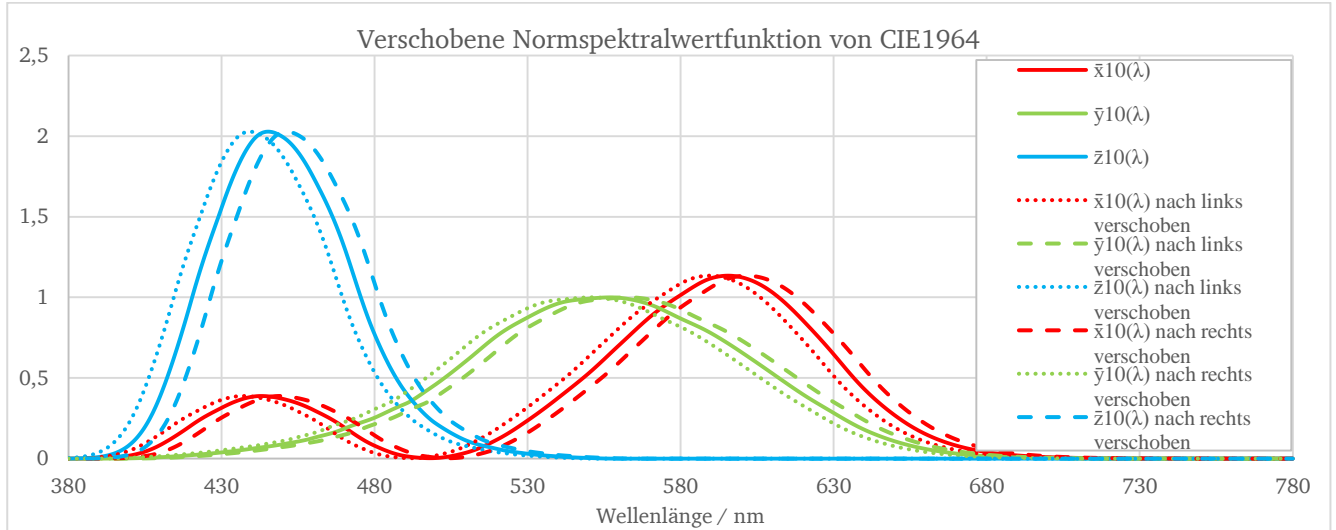


Abbildung 65: Die Graphen mit den durchgezogenen Linien sind Normspektralwertfunktionen von 1964. Die gestrichelten Linien stellen die um 6nm nach rechts verschobenen Originalkurven dar, die gepunkteten Linien die um 6nm nach links verschobenen Kurven.

Des Weiteren werden die Farbabstände zwischen den jeweiligen Referenzlichtquellen und ihren entsprechenden RGB und RGBW-Einstellungen untersucht. Wie in den vorhergehenden Kapiteln werden die modifizierten Spektralwertfunktionen mit der Normspektralwertfunktion von 1964 verglichen. Dabei wird von den bisherigen Nullhypothesen ausgegangen, dass der Abstand  $\Delta \bar{E}^{\text{RGB}}$  größer ist als der Abstand  $\Delta \bar{E}^{\text{RGBW}}$  ( $H_0: \mu^{\text{RGB}} > \mu_0^{\text{RGB}}$ ) und dass die Normspektralwertfunktion von 1964 den kleinstmöglichen Abstand zwischen der Referenz und den jeweiligen RGB bzw. RGBW-Einstellungen generiert ( $\mu_{\text{alternativ}} > \mu_{0,1964}$ ). Es wird außerdem wieder die Hypothese angenommen, dass der Abstand nach einem visuellen Abgleich für die 2700 K-Abstände geringer ist als für die 5200 K-Abstände ( $\mu_{5200\text{K}} > \mu_{0,2700\text{K}}$ ). Die Tabellen mit den Prüfwerten der Nullhypothesen sind im Anhang D zu finden. Es wird wie zuvor von einem 95 %- Konfidenzintervall und 10 Freiheitsgraden ausgegangen.

Zusätzlich wird die Nullhypothese 4 aufgestellt:  $H_0: \mu_w > \mu_{0,n}$ . Hier wird davon ausgegangen, dass die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGB}}$  bzw.  $\Delta \bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$  größer werden, je weiter sich die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktionen von ihrer ursprünglichen Position entfernen. Dabei ist  $\mu_{0,n}$  der Abstand, der mit der modifizierten Funktion berechnet wird, die näher an der Position der Originalkurven liegt. Die Größe  $\mu_w$  entspricht dem Abstand, der mit der nächstliegenden weiteren Verschiebung berechnet wird. Beispiel: wenn  $\mu_{0,n}$  mit einer Spektralwertfunktion berechnet wird, die um 1 nm verschoben ist, dann ist  $\mu_w$  mit einer um 2 nm verschobenen Funktion berechnet. Für die Berechnung des Abstandes wurden bereits die Farborte der elf Testpersonen gemäß den Formeln (45) bis (53) gemittelt (siehe Kapitel 2.3.8).

## Einfluss der Verschiebung der $\bar{x}_{10}(\lambda)$ - Kurven auf die Abstände $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$ und $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Die berechneten mittleren Abstände und die entsprechenden Konfidenzintervalle mit einem Konfidenzniveau von 95 % der 5200 K-Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Funktionen in Abbildung 66 als Balkendiagramm dargestellt. Die entsprechenden numerischen Werte sind im Anhang Abschnitt D aufgelistet.

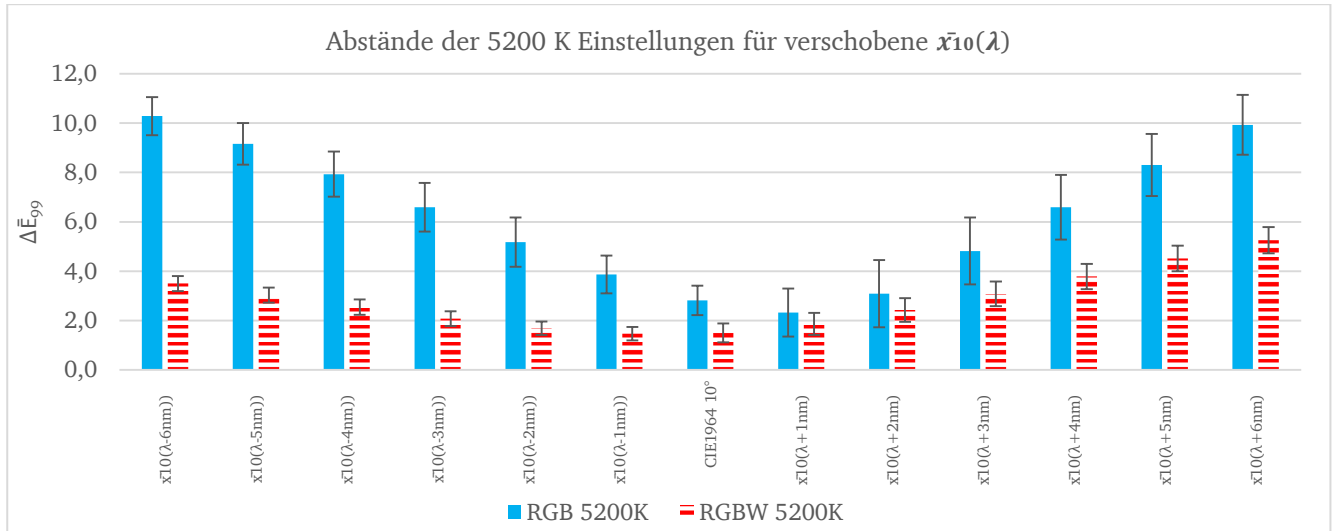


Abbildung 66: Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 % Konfidenzintervalle.

Die Konfidenzintervalle für die mittleren Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind größer als für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Des Weiteren sind unabhängig von der Verschiebung der  $\bar{x}_{10}$ -Kurve auch die mittleren Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer als die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Die Verschiebung beeinflusst die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  stärker als die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Die Nullhypothese 1 ( $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{5200K}^{RGBW}$ ) für Verschiebungen der  $\bar{x}_{10}$ -Kurve zu den kürzeren Wellenlängen wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen, d.h. der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  ist bei einer Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen größer als  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Bei Verschiebungen zu den längeren Wellenlängen um bis zu 2 nm wird die Hypothese abgelehnt, möglicherweise aufgrund der starken Überlagerung der Konfidenzintervalle. Ab 3 nm wird die Nullhypothese wieder angenommen.

Wird die  $\bar{x}_{10}$ -Kurve von ihrer ursprünglichen Position nach links zu den kürzeren Wellenlängen hin verschoben, steigt der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2 % stetig an. Die Nullhypothese 2 ( $\mu_{alternativ\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$ ) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % angenommen. Die Nullhypothese 4 ( $\mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0n\_5200K}^{RGB}$ ) wird zum Signifikanzniveau von 2,5 % angenommen. Werden die Kurven nach rechts zu den längeren Wellenlängen verschoben, wird der Abstand bei einer Verschiebung um 1 nm etwas geringer, bevor  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  ab Verschiebungen von mehr als 3 nm mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % ansteigt.

Der Einfluss der Verschiebung der  $\bar{x}_{10}$  auf  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  ist vergleichbar mit den Ergebnissen für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . Wird die  $\bar{x}_{10}$ -Kurve von ihrer ursprünglichen Position wegbewegt nimmt

der mittlere Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  stetig zu. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % kann davon ausgegangen werden, dass der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  bei einer Verschiebung größer wird.

### Einfluss der Verschiebung der $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Kurven auf die Abstände $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ und $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Die berechneten mittleren Abstände und die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle der 5200 K-Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Funktionen in Abbildung 67 als Balkendiagramm dargestellt.

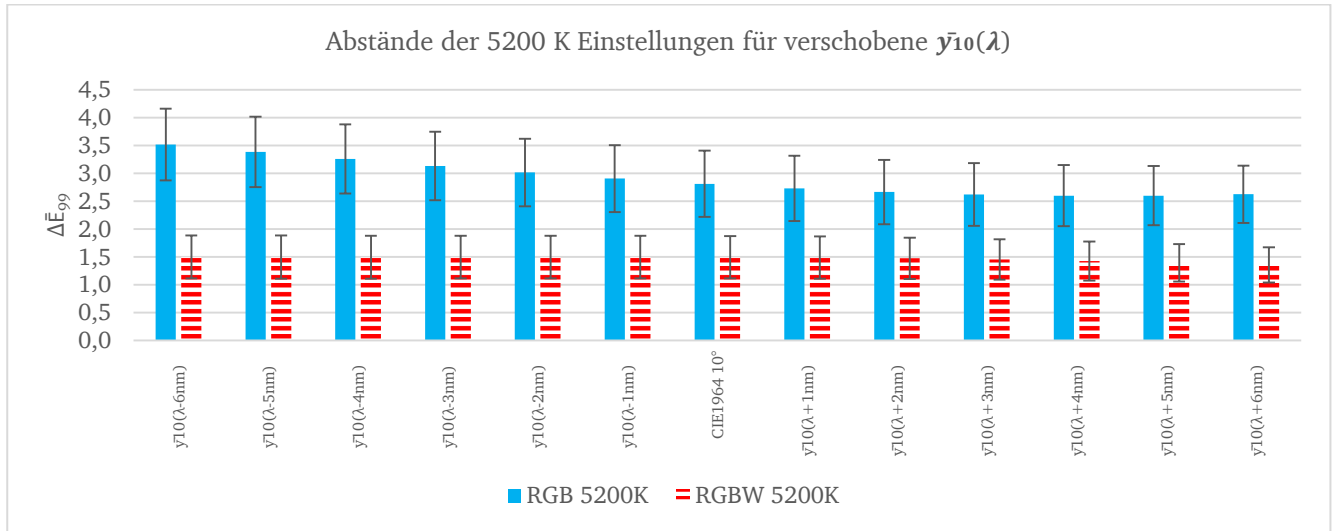


Abbildung 67: Farbabstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  zwischen der 5200K Referenz und der 5200 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 % Konfidenzintervalle.

Wie sich am Diagramm ablesen lässt, sind die Konfidenzintervalle für die mittleren Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer als für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Bei einer Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen wird der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  etwas größer im Vergleich zu dem relativ gleichbleibenden Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , der unabhängig von der Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Kurve bleibt. Die Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen beeinflusst also hauptsächlich die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  wesentlich stärker. Eine Überprüfung dieser Beobachtung mit der Nullhypothese 1  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{5200K}^{RGBW}$  zeigt, dass die Hypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen werden kann, d.h. der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  ist unabhängig von der Verschiebung größer als der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ .

Werden die Kurven nach links zu den kürzeren Wellenlängen hin verschoben, steigen die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  nur geringfügig, aber stetig an. Für die Verschiebungen um bis zu 3 nm wird die Nullhypothese 2 ( $\mu_{alternativ,5200K}^{RGB} > \mu_{0,1964,5200K}^{RGB}$ ) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % zwar abgelehnt, kann aber ab Verschiebungen von 4 nm wieder angenommen werden. Die Nullhypothese 4 ( $H_0: \mu_{w,5200K}^{RGB} > \mu_{0n,5200K}^{RGB}$ ) wird dagegen bereits mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Ein möglicher Grund dafür ist die starke Überlagerung der Konfidenzintervalle der einzelnen Verschiebungen. Ausgehend von dem Ergebnis der Nullhypothesen 2 und 4 kann erst ab einer Verschiebung von 5 nm zu kürzeren Wellenlängen davon ausgegangen werden, dass der mittlere Abstand zunimmt.

Werden die Kurven nach rechts zu den längeren Wellenlängen verschoben, ist im Unterschied dazu keine wesentliche Veränderung von  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  erkennbar. Die Nullhypothese 2 wird für die Verschiebungen zu den längeren Wellenlängen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 10 % abgelehnt. Die Nullhypothese 4  $\mu_{w_{5200K}}^{RGB} > \mu_{0_{n_{5200K}}}^{RGB}$  wird für die Verschiebungen nach rechts mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Somit wird bestätigt, dass die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  durch eine Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurve zu den längeren Wellenlängen nicht beeinflusst wird, was auch für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  gilt, die sich bei der Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurve kaum ändern.

### **Einfluss der Verschiebung der $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurven auf die Abstände $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ und $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$**

Die berechneten mittleren Abstände und die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle der 5200 K-Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Funktionen in Abbildung 68 als Balkendiagramm dargestellt.

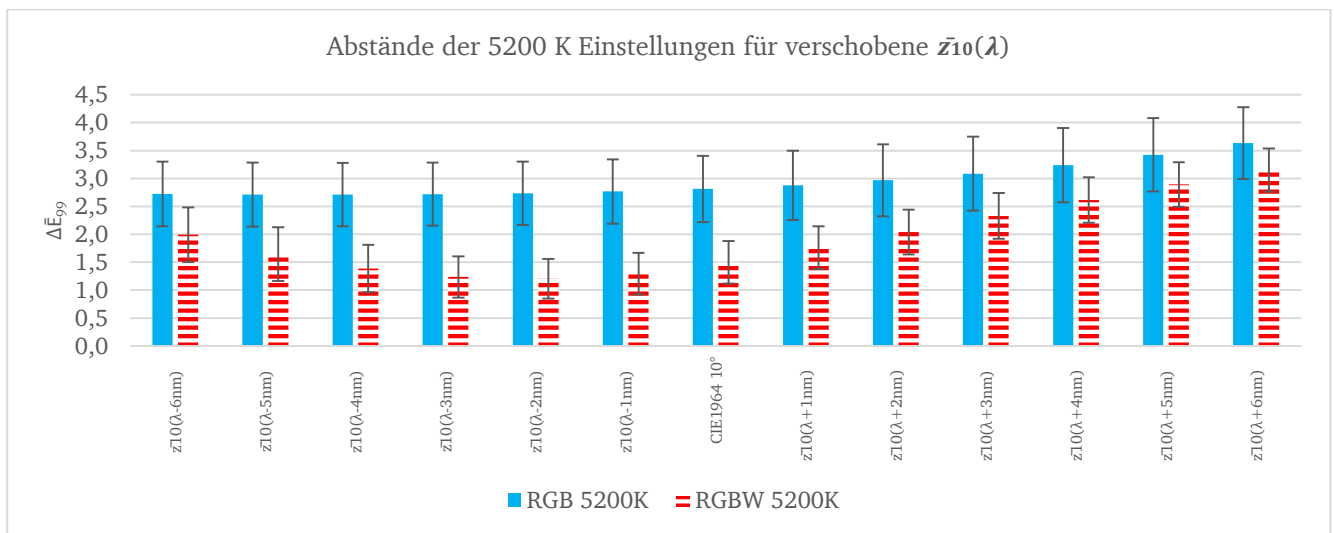


Abbildung 68: Farbabstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGB-Einstellung (volle Balken) bzw. der 5200 K RGBW-Einstellung (gestrichelte Balken) mit einer Bewertung der verschobenen  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 %-Konfidenzintervalle.

Die Konfidenzintervalle für die mittleren Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind größer als für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Außerdem sind die mittleren Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  unabhängig von der Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve, deutlich größer als die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , wobei  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  durch die Verschiebung der Kurve sehr viel stärker beeinflusst wird. Des Weiteren kommt es bei der Verschiebung zu längeren Wellenlängen zu starken Überschneidungen zwischen den Konfidenzintervallen der Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ .

Die Nullhypothese 1  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{5200K}^{RGBW}$  wird für die Verschiebung der Kurve zu den kürzeren Wellenlängen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen. Werden die Kurven dagegen zu den längeren Wellenlängen bewegt, wird die Nullhypothese nur bis 3 nm angenommen und ab 4 nm mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt, d.h. es besteht die Möglichkeit, dass der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  größere Werte als  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  annehmen kann.



Werden die Kurven nach links zu den kürzeren Wellenlängen hin verschoben, bleibt der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  relativ unbeeinflusst. Für die RGB 5200 K-Einstellungen wird bei Verschiebungen zu den kürzeren Wellenlängen die Nullhypothese 2 ( $\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$ ) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % abgelehnt und die Nullhypothese 4 ( $\mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_n\_5200K}^{RGB}$ ) wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Werden die Kurven zu den längeren Wellenlängen verschoben, nimmt der mittlere Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  zu. Dabei kann die Nullhypothese 2  $\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{RGB} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{RGB}$  ab einer Verschiebung von mehr als 4 nm zum Signifikanzniveau  $\alpha = 10\%$  angenommen werden, während die Nullhypothese 4 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt wird. Man kann daher nicht von einem kontinuierlichen Anstieg von  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  ausgehen.

Der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  wird von der Veränderung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve stärker beeinflusst als  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . Wird die Kurve zu kürzeren Wellenlängen verschoben, wird der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  zunächst kleiner, bevor dieser ab einer Verschiebung von 3 nm wieder anfängt zu steigen. Die Nullhypothese 2 wird bei Verschiebungen von bis zu 5 nm mit einer Signifikanz von 10 % abgelehnt. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass der Abstand signifikant größer wird, je weiter sich die Kurve von ihrer ursprünglichen Position wegbewegt. Die Nullhypothese 4 wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt, d.h. dass bei einer Verschiebung nicht von einem kontinuierlichen Anstieg des Abstandes  $\Delta \bar{E}_{RGBW\ 5200K}$  ausgegangen werden kann. Wird die  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve zu den längeren Wellenlängen verschoben, so zeigt Abbildung 68, dass der Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  steigt. Die Nullhypothese 2 wird mit Wahrscheinlichkeit von 90 % angenommen. Die Nullhypothese 4 wird im Unterschied dazu mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Dies bedeutet, dass man nicht von einem kontinuierlichen Anstieg ausgehen kann, auch wenn der mittlere Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  wächst, je weiter die Kurve verschoben wird. .

### **Einfluss der Verschiebung der $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven auf die Abstände $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$ und $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$**

Die berechneten mittleren Abstände und die entsprechenden 95 % Konfidenzintervalle der 5200 K-Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Funktionen in Abbildung 69 als Balkendiagramm dargestellt.



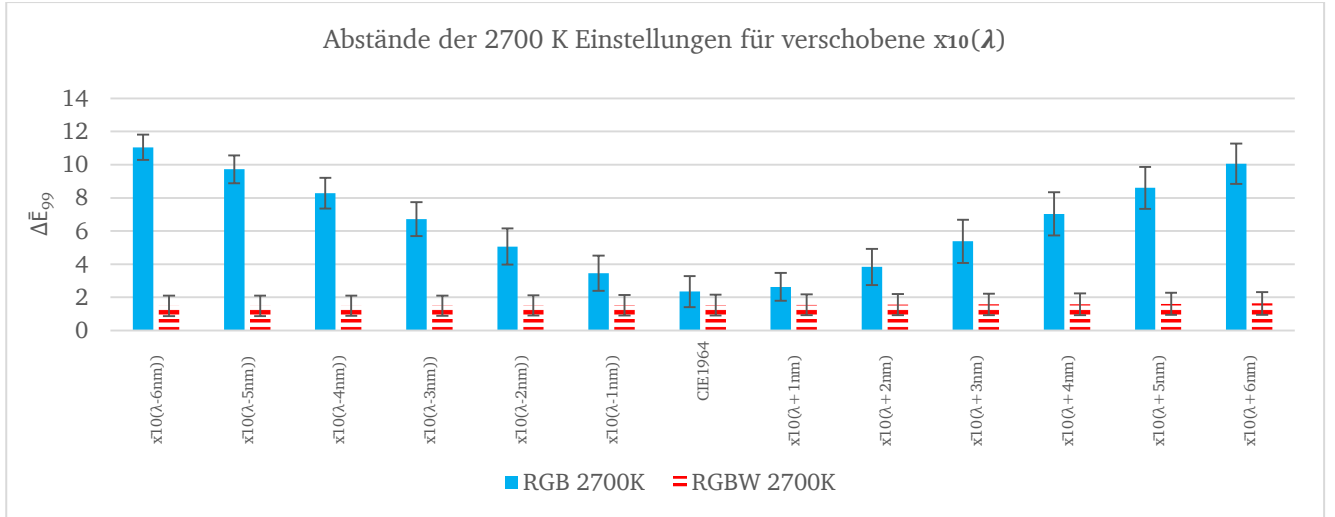


Abbildung 69: Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 % Konfidenzintervalle.

Der Vergleich der Abbildung 69 mit Abbildung 66 zeigt für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  dieselben Tendenzen wie für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  werden zum einen die Konfidenzintervalle durch eine Verschiebung der Kurven stärker beeinflusst und zum anderen sind für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  die Abstände mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % größer als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

Bei einer Verschiebung der Kurven zu den kürzeren Wellenlängen ist der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % größer als bei Verwendung der unveränderten Normspektralwertfunktion CIE1964 (Nullhypothese 2). Bei einer Verschiebung zu den längeren Wellenlängen wird der Abstand erst bei 2 nm mit einer 97,5 % Wahrscheinlichkeit größer. Für eine 1 nm Verschiebung wird die Nullhypothese 2 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt.

Die Nullhypothese 4 prüft, ob sich die Abstände kontinuierlich vergrößern, je weiter sich die Kurven von ihrer ursprünglichen Position entfernen. Diese Hypothese wird für die Verschiebung zu den kürzeren Wellen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen. Bei einer Verschiebung um 2 nm zu den längeren Wellenlängen wird die Nullhypothese 4 mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen.

Das Ergebnis für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  unterscheidet sich insofern von  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , dass unabhängig von der Verschiebung der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ - Kurve die Nullhypothese 2  $\mu_{\text{alternativ}_{2700K}}^{RGBW} > \mu_{0_{1964},2700K}^{RGBW}$  für die RGBW 2700 K Einstellungen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt wird. Der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  bleibt somit von einer Veränderung unbeeinflusst.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der 5200 K-Einstellungen mit denen der 2700 K-Einstellungen verglichen. Mit der Nullhypothese 3 ( $H_0: \mu_{5200K} > \mu_{0,2700K}$ ) wird überprüft, ob für die beiden Farbtemperaturen tendenziell vergleichbare Abstände  $\Delta\bar{E}_{99}$  berechnet werden.

Abbildung 70 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

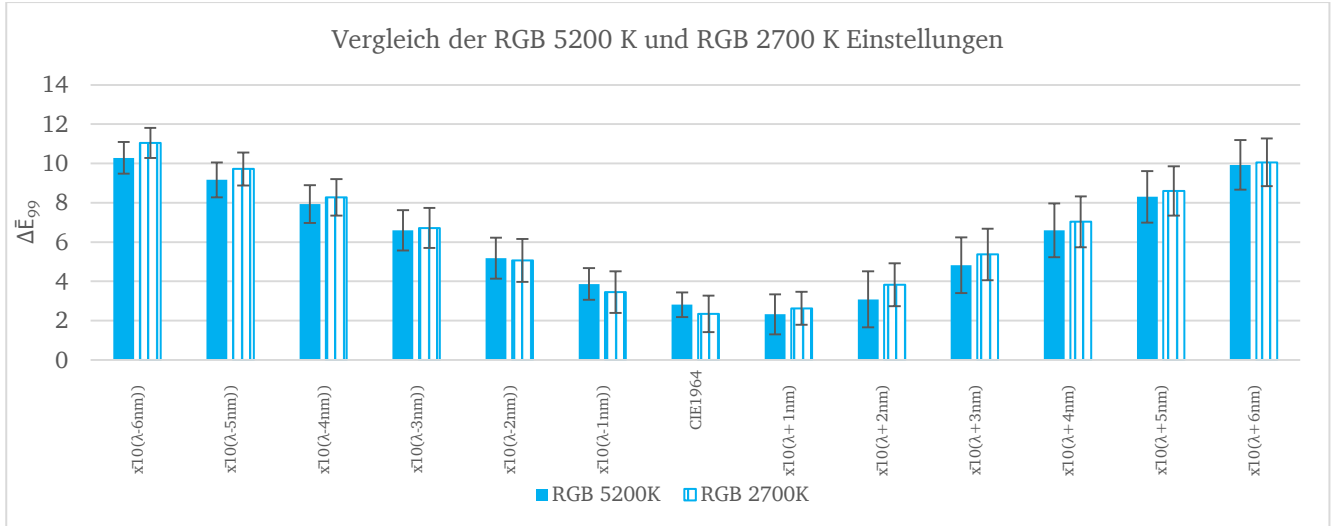


Abbildung 70: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle als Balkendiagrammen dargestellt.

Die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  bei einzelnen Verschiebungen weisen immer vergleichbar große Konfidenzintervalle auf. Ausnahmen sind die unveränderte CIE1964 Normspektralwertfunktion, sowie Verschiebungen zwischen -1 nm bis +2 nm. Generell scheint der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  etwas geringer zu sein als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Die Nullhypothese 3 wird für jede Verschiebung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt.

Abbildung 71 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

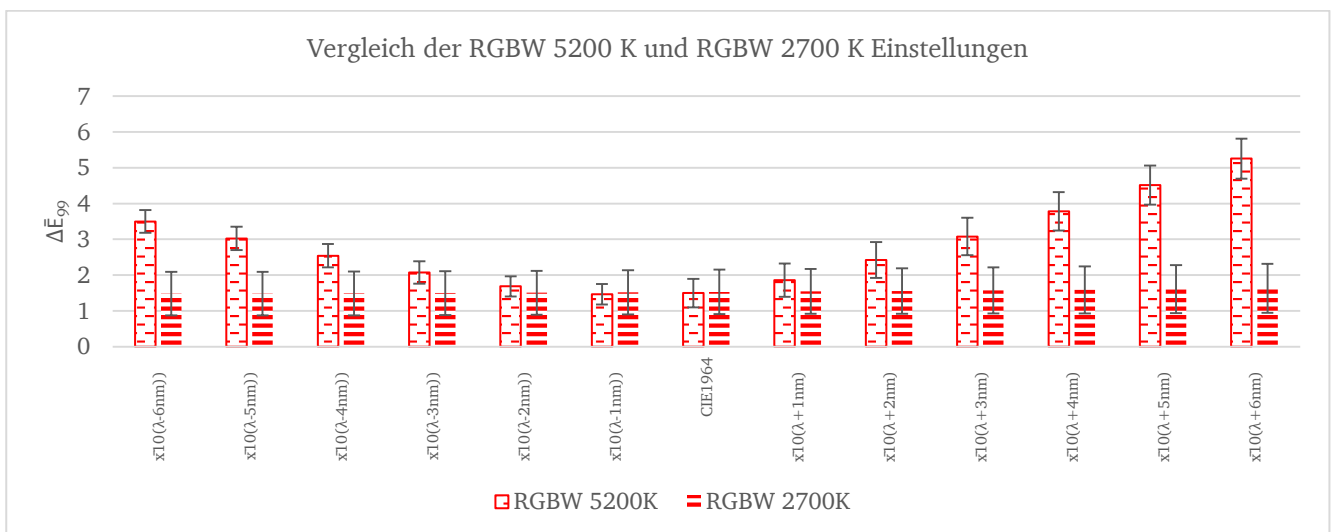


Abbildung 71: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt.

Die Konfidenzintervalle der Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  sind kleiner als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Des Weiteren wird  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  durch die Verschiebung der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurve kaum beeinflusst, während  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  sowohl bei links- als auch rechtsseitigen Verschiebungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % ansteigt.

Für Verschiebungen zu den kürzeren Wellenlängen wird die Nullhypothese 3 ab -3 nm mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen, während sie davor abgelehnt wird. Bei Ver-

schiebungen zu den längeren Wellenlängen wird die Nullhypothese ab 2 nm angenommen. D.h. für den Bereich -2 nm bis 1 nm kann wiederum keine Aussage darüber getroffen werden, ob  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  größer ist als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

### **Einfluss der Verschiebung der $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Kurven auf die Abstände $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ und $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$**

Die mittleren Abstände und die entsprechenden 95 % Konfidenzintervalle der 2700 K Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Funktion in Abbildung 72 als Balkendiagramm dargestellt. Die entsprechenden numerischen Werte sind im Anhang D in Tabelle 33 aufgelistet.

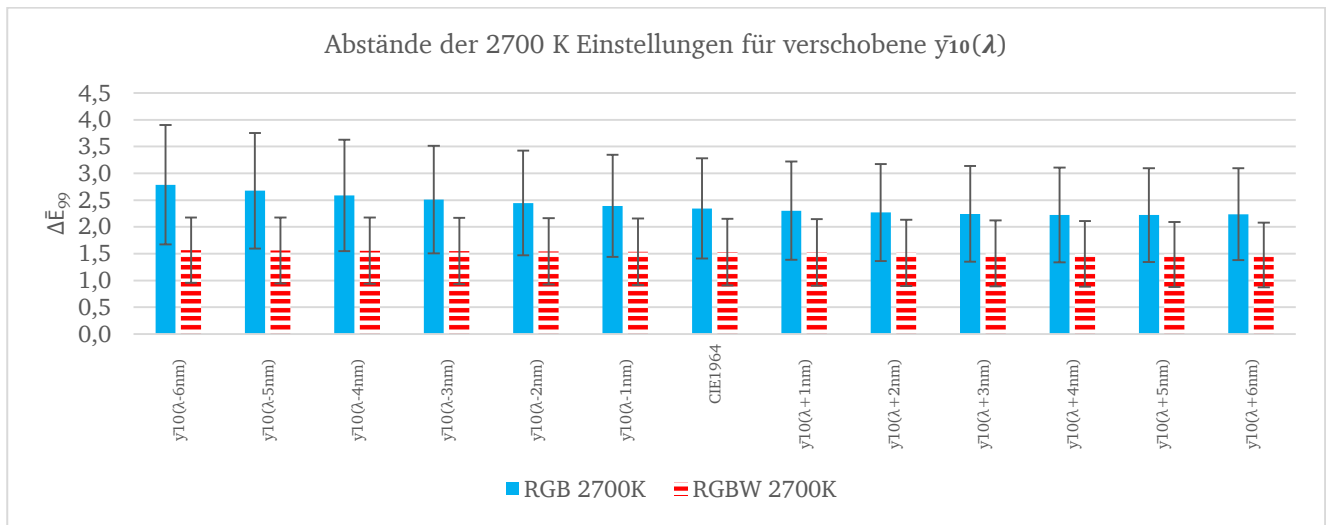


Abbildung 72: Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW-Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 % Konfidenzintervalle.

Ein Vergleich mit Abbildung 67 zeigt für die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  ähnliche Tendenzen wie für Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Die 95 % Konfidenzintervalle sind für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  größer als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , auch die Abstände für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sind größer als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , wobei  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  durch die Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Funktion stärker beeinflusst wird. Bei einer Verschiebung der Kurve zu den kürzeren Wellenlängen nimmt  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  leicht zu, während zu den längeren Wellenlängen hin kaum Unterschiede zu erkennen sind. Der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  scheint sogar von einer Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Funktion völlig unbeeinflusst zu sein. Im Gegensatz zu einer Betrachtung der Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  gibt es bei den Konfidenzintervallen für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  große Überlappungen.

Die starke Überlappung bei den 95 %- Konfidenzintervallen ist ein möglicher Grund, warum die Nullhypothese 1  $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{2700K}^{RGBW}$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt wird. Nur die Verschiebungen der Kurve von mehr als 4 nm zu den kürzeren Wellenlängen zeigen weniger Überschneidungen bzw. größere Unterschiede, so dass für diese Konfidenzintervalle die Hypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen wird. Die Nullhypothesen 2 und 4 werden dagegen sowohl für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  als auch für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Es kann für RGB und RGBW Einstellungen mit

einer Wahrscheinlichkeit von 97,5% davon ausgegangen werden, dass eine Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Funktion den Abstand nicht beeinflusst.

Abbildung 73 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

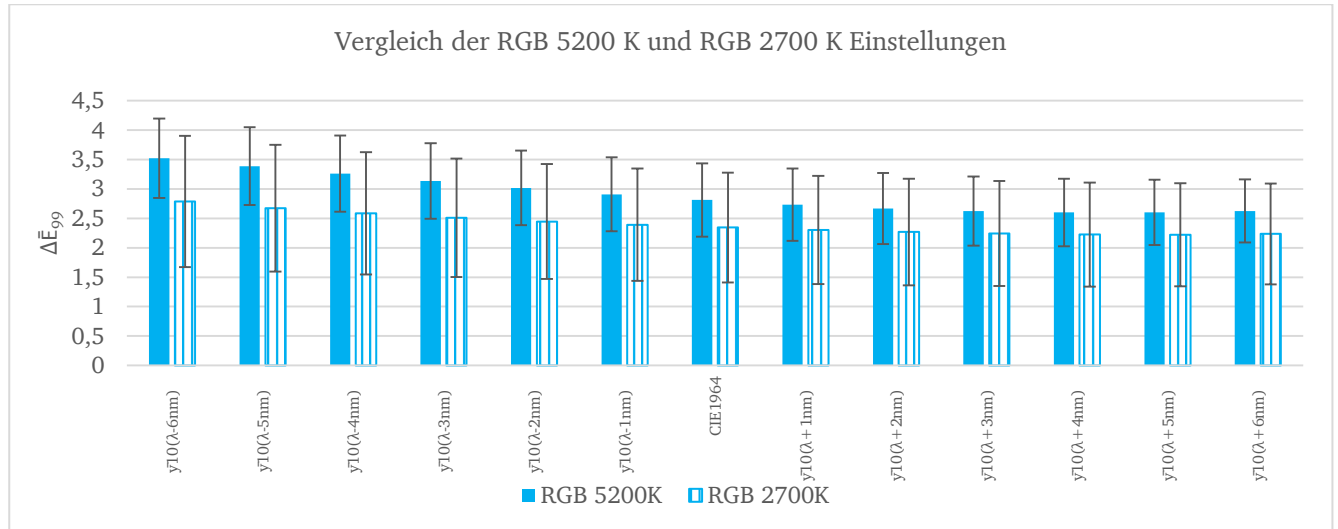


Abbildung 73: Die über elf Testpersonen gemittelten Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt.

Die Konfidenzintervalle für die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind eindeutig kleiner als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  ist zeigen sich bei sämtlichen Verschiebungen etwas größer als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Des Weiteren scheinen beide Abstände von der Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Funktion zu den längeren Wellenlängen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % weniger beeinflusst zu werden als es bei den kürzeren Wellenlängen der Fall ist.

Die Nullhypothese 3 wird für Verschiebungen ab -4 nm zu den kürzeren Wellenlängen angenommen. Für alle anderen Modifikationen wird sie dagegen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt. Auch für den Bereich -3 nm bis 6 nm kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  größer ist als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .

Abbildung 74 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

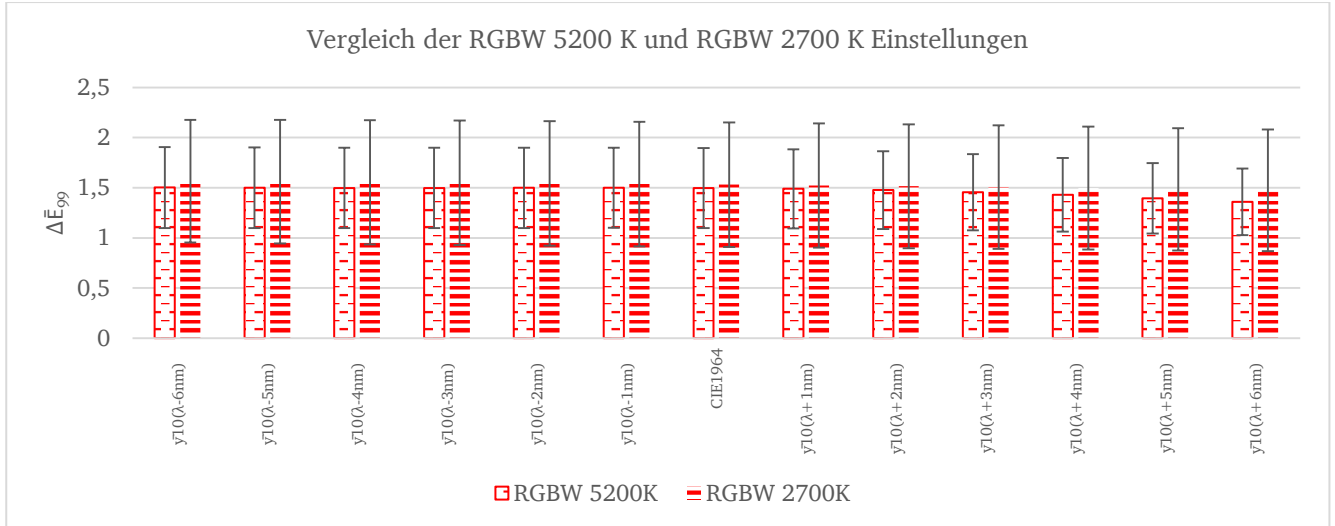


Abbildung 74: Die über elf Testpersonen gemittelten Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle als Balkendiagrammen.

Die 95 % Konfidenzintervalle sind für die  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  größer als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ . Die gemittelten Abstände bleiben bei beiden Farbtemperaturen unbeeinflusst von einer Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Funktion. Die Nullhypothese 3 wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt.

### **Einfluss der Verschiebung der $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurven auf die Abstände $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ und $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$**

Die berechneten mittleren Abstände und die entsprechenden 95 % Konfidenzintervalle der 5200 K Einstellungen sind unter Verwendung der ursprünglichen sowie der verschobenen  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktionen in Abbildung 75 als Balkendiagramm dargestellt.

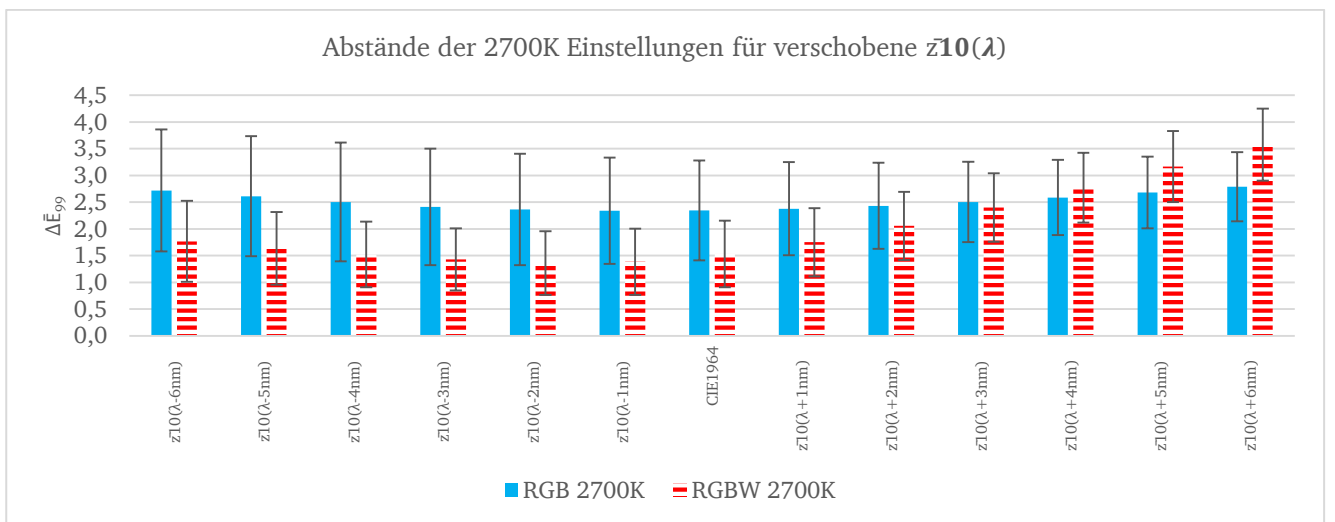


Abbildung 75: Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB-Einstellung (volle Balken) bzw. der 2700 K RGBW Einstellung (gestrichelte Balken) nach einer Bewertung mit verschobenen  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurven. Es wird für die Abstände von 10 Freiheitsgraden ausgegangen. Zusätzlich eingezeichnet sind die 95 % Konfidenzintervalle.

Eine Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion zu den kürzeren Wellenlängen übt einen geringeren Einfluss auf die Abstände ( $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ ) aus als eine Verschiebung zu den längeren Wellenlängen aus. Bei der Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen sind die 95 %-Konfidenzintervalle sowohl für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , als auch für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  größer, als bei der Verschiebung zu längeren Wellenlängen.

Je weiter sich die  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion von ihrer ursprünglichen Position zu den längeren Wellenlängen verschieben, desto stärker wächst der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  an, bis er ab 4 nm sogar größer ist als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Die Nullhypothese 1 wird für diese Verschiebung mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu 90 % angenommen. Ab 3 nm wird die Nullhypothese 1 abgelehnt, d.h.  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  ist größer als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .

Die Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion zu den kürzeren Wellenlängen hat keinen wesentlichen Einfluss auf  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Die Nullhypothesen 2 und 4 werden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt. Es kann also weder von einem gleichmäßigen Anstieg ausgegangen werden, noch davon, dass  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  größer wird, je weiter sich  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion von ihrer ursprünglichen Position entfernt.

Bei der Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion zu längeren Wellenlängen ist zwar ein geringfügiger Anstieg des Abstandes  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  zu erkennen, aber diese Beobachtung wird nicht durch die Nullhypothesen 2 und 4 bestätigt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % kommt es somit zu keinem Anstieg des Abstandes.

Auch bei der Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion zu den kürzeren Wellenlängen ist kein großer Einfluss auf  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  erkennbar. Die Nullhypothesen 2 und 4 werden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit 2,5 % abgelehnt. Es kann also auch hier weder von einem gleichmäßigen Anstieg ausgegangen werden, noch davon, dass  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  größer werden, wenn sich die  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion von ihrer ursprünglichen Position entfernt.

Eine Verschiebung zu den längeren Wellenlängen lässt dagegen den Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  stark ansteigen. Die Nullhypothese 2 wird für Verschiebungen von bis 2 nm noch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt, was wahrscheinlich mit der starken Überlappung der Konfidenzintervalle zusammenhängt. Ab 3 nm aber wird die Nullhypothese 2 mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % angenommen. Die Nullhypothese 4 wird bei längeren Wellenlängen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  wird zwar größer, je weiter sich  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion von ihrer ursprünglichen Position entfernt, allerdings kann aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle nicht von einem kontinuierlichen Anstieg ausgegangen werden.

Abbildung 76 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

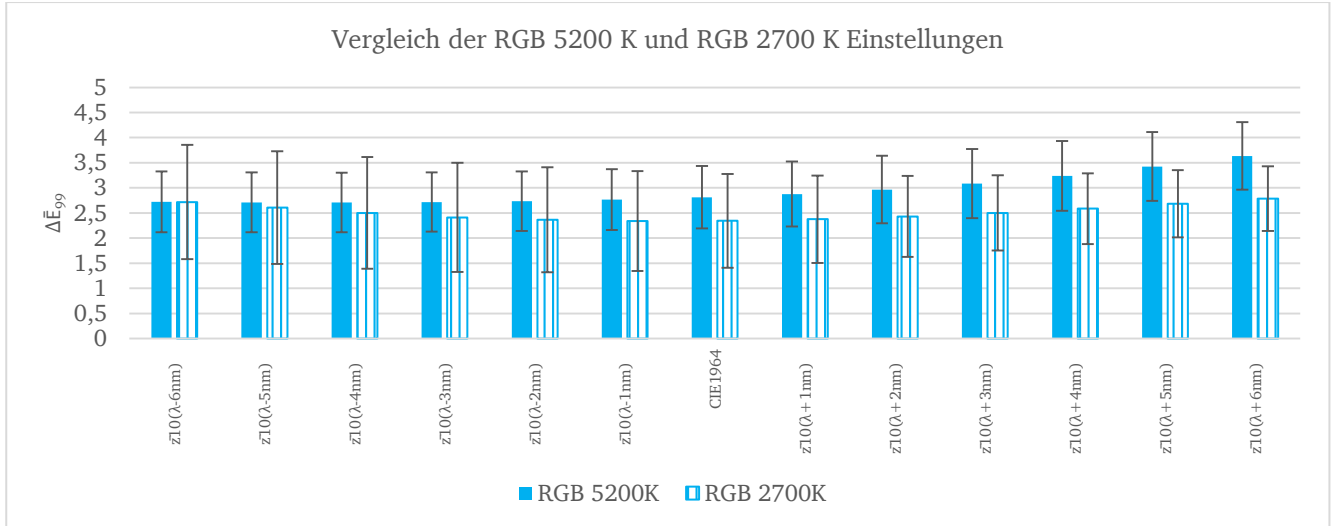


Abbildung 76: Über elf Testpersonen gemittelten Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt.

Die Konfidenzintervalle sind für die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  im Allgemeinen kleiner als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ . Die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind generell etwas größer als  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , wobei der Unterschied für Verschiebungen der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion zu den kürzeren Wellenlängen geringer ist als für Verschiebungen zu längeren Wellenlängen. Die Nullhypothese 3 wird daher für sämtliche Verschiebungen zwischen -6 nm und 4 nm mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt. Nur für Verschiebungen der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion um 5 nm und 6 nm zu den längeren Wellenlängen kann die Hypothese angenommen werden.

Abbildung 77 zeigt die gemittelten Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen.

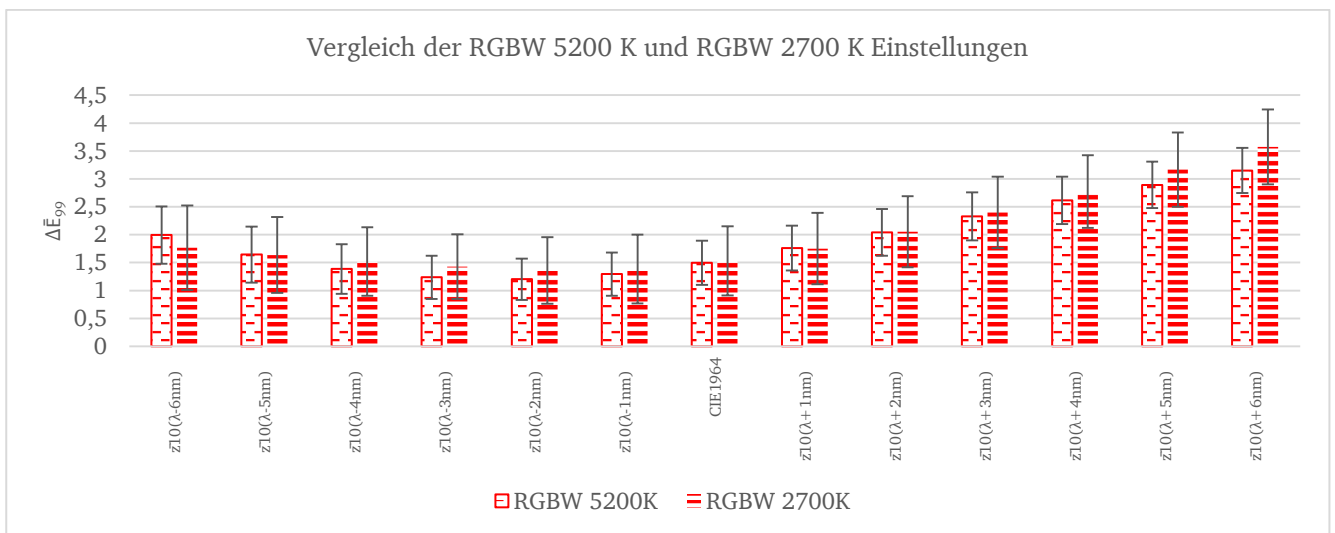


Abbildung 77: Über elf Testpersonen gemittelte Farbabstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle, als Balkendiagramme dargestellt.

Abbildung 77 zeigt, dass die Konfidenzintervalle für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  kleiner sind als für  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  und dass sowohl  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  als auch  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  durch die Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurve ähnlich stark beeinflusst werden. Die Nullhypothese 3 wird für alle Modifikationen der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurve mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % abgelehnt.



Zusammenfassend zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass die Modifikationen der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - und  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven die verschiedenen RGB- und RGBW-Einstellungen unterschiedlich stark beeinflussen. Im Allgemeinen wird die RGB-Einstellung stärker beeinflusst als die RGBW-Einstellung, was mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % in einem größeren Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  bzw.  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  resultiert. Eine Ausnahme ist der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , der durch eine Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve zu längeren Wellenlängen größer wird, als der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$ .

Die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurve lässt die Abstände der 5200 K Einstellungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % ansteigen, je weiter sich die Kurve von ihrer ursprünglichen Position entfernt. Bei den 2700 K Einstellungen wird nur  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  durch die Verschiebung der Kurve beeinflusst. Die Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurve hat im Allgemeinen keinen erkennbaren Einfluss auf die verschiedenen Abstände. Die  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve beeinflusst die Abstände der RGB-Einstellungen bei beiden Farbtemperaturen wesentlich stärker als die dementsprechenden Abstände der RGBW-Einstellungen. Dabei lassen Verschiebungen zu den längeren Wellenlängen generell die Abstände ansteigen, während bei einer Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen zu beachten gilt, dass die Abstände zunächst kleiner werden oder gleich bleiben, bevor sie wieder ansteigen. Der Vergleich der beiden Farbtemperaturen liefert aufgrund der starken Überlappung der Konfidenzintervalle keinen klar erkennbaren Unterschied zwischen den Abständen  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  bzw.  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  bzw.  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

#### 4.1.5 Intrapersonelle Betrachtung der Normspektralwertfunktionen anhand der individuellen Funktionen von Stiles und Burch

Die konventionelle Methode zur Bestimmung des Farbortes basiert auf der Verwendung einer einzelnen Spektralwertfunktion. Dabei wird die benötigte Funktion anhand des Schwinkels ausgesucht (Abschnitt 2.3). Die individuelle Wahrnehmung bleibt unberücksichtigt. Für diese Arbeit wurden den einzelnen Testpersonen individuelle Kurven aus den Versuchen von Stiles und Bruch zugeordnet. Auf diese Weise sollten diejenigen Spektralwertfunktionen identifiziert werden, die für möglichst viele Beobachter einen möglichst geringen Abstand zwischen den Referenzen und den RGB- und RGBW-Einstellungen ergeben. Die Zuordnung der Funktionen zu den jeweiligen Testpersonen wird anhand ausgewählter Beispiele vorgestellt. Eine vollständige Auflistung der jeweiligen Abstände zwischen den beiden Referenzen und den entsprechenden RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie den 95 %-Konfidenzintervallen ist im Anhang E zu finden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln wird auch hier von elf Testpersonen ausgegangen, von denen jede den Versuch für die 5200 K Einstellungen mindestens vier- bis sechsmal wiederholt hat. Die 2700 K Einstellungen wurden ein bis dreimal durchgeführt. Zwar zeigen die Ergebnisse der 2700 K Einstellungen erkennbare Tendenzen beim Einstellverhalten der Testpersonen, allerdings ist die statistische Aussage aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsdurchläufen pro Testperson mit einem größeren Fehler behaftet als für die 5200 K Einstellungen.

Aus den Tabellen Tabelle 57 bis Tabelle 60 (Anhang E) geht hervor, dass den einzelnen Testpersonen generell eine eigene Spektralwertfunktion zugewiesen werden kann, was die unter-



schiedliche Wahrnehmung zwischen den Beobachtern bestätigt. In extremen Fällen können Spektralwertfunktionen, die für eine Testperson X einen geringsten Abstand berechnen, für andere Testpersonen zu sehr großen Abständen führen, wie in Abbildung 78 beispielhaft für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  dargestellt ist.

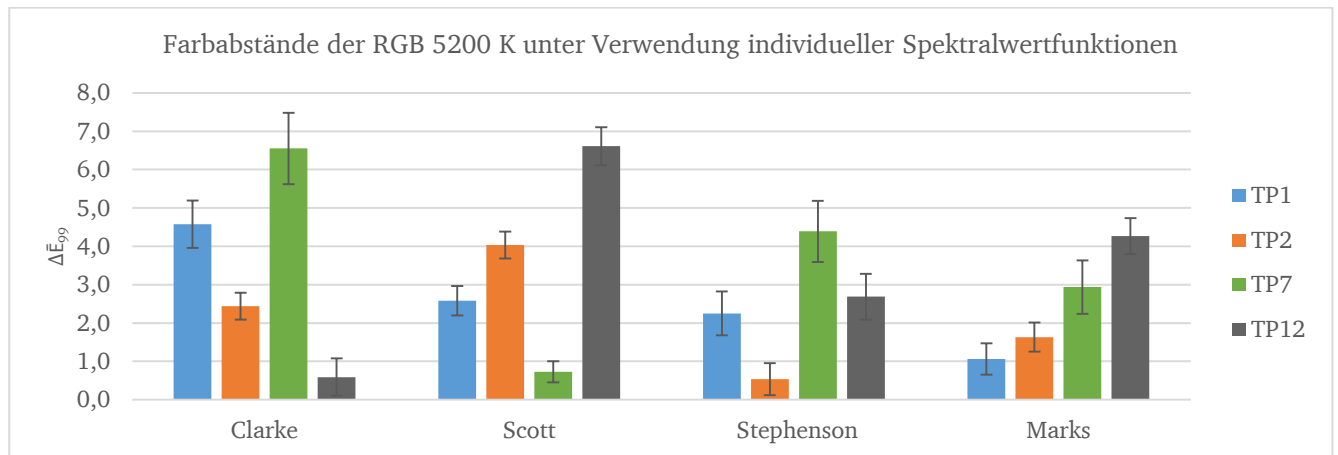


Abbildung 78: Mittlerer Farbabstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  für die individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch für einige ausgewählten Testpersonen (TP). Zusätzlich eingetragen sind die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle. Jede Testperson hat bei dem Versuch jeden Abgleich 4-6 mal durchgeführt. Es ist kein Muster erkennbar.

Die individuellen Spektralwertfunktionen berechnen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9 % nur für die jeweils zugewiesenen Testpersonen TP1, TP2, TP7 und TP12 den geringsten Abstand. Allerdings sind auch vereinzelt Testpersonen zu erkennen, für welche sich unter Verwendung der gleichen Spektralwertfunktionen nur vergleichbare Abstände ergeben, wie in Abbildung 79 für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  zu sehen ist.

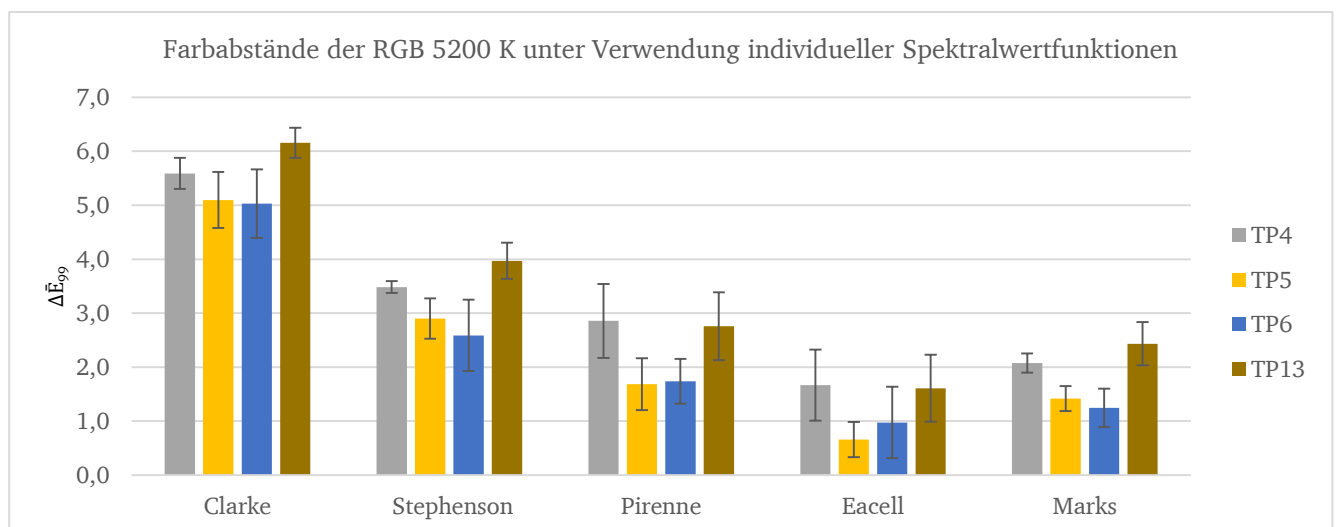


Abbildung 79: Zuweisung der individuellen Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch zu ausgewählten Gruppierung von Testpersonen (TP). Zusätzlich eingetragen sind die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle. Jede Testperson hat bei dem Versuch diese Einstellung 4-6 mal durchgeführt.

Obwohl sich die Abstände der einzelnen Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktionen unterscheiden, lassen sich tendenzielle Gemeinsamkeiten bei der Einteilung der

Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  erkennen. Zum Beispiel ist unter Verwendung der Spektralwertfunktion von Eacell der mittlere Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  für alle Testpersonen am kleinsten. Unter Verwendung der Funktionen von D.C.Marks, Pirenne und Stephenson steigt der Abstand an, bis er bei Clarke sein Maximum erreicht. Es ist anzumerken, dass sich dieser Anstieg für einige Testpersonen nur für die gemittelten Abstände tendenziell so verhält. Testperson 5 berechnet z.B. mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9 % nur unter Verwendung der Funktion von Eacell den kleinsten Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . Testperson 6 berechnet ebenfalls unter Verwendung der Spektralwertfunktion von Eacell den kleinsten mittleren Abstand, allerdings überlappt sich dessen Konfidenzintervall mit denen der Funktionen von D.C.Marks und Pirenne. Somit ist die Aussage, dass die Funktion von Eacell den kleinsten Abstand berechnet, nicht statistisch gesichert. Für Testperson 6 könnte demzufolge zusätzlich für die Funktion von Eacell auch die Funktion von D.C.Marks den geringsten Abstand berechnen.

Aufgrund der Überlappungen der Konfidenzintervalle können also einigen Testpersonen mehrere Spektralwertfunktionen zugewiesen werden, wie Abbildung 79 am Beispiel von TP1 für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  zu erkennen ist.

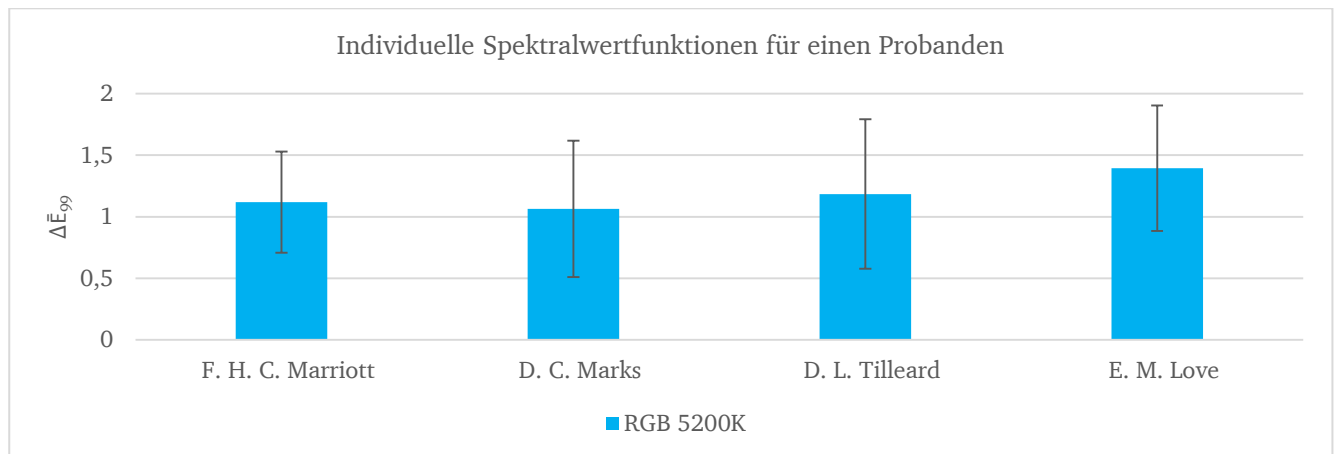


Abbildung 80: Gemittelten Farbabstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  für Testperson 1 mit den entsprechenden 95 %- Konfidenzintervallen. Aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle kann der Testperson mehr als eine Spektralwertfunktion zugewiesen werden. Die Testperson hat den Versuch neunmal durchgeführt.

Die Ergebnisse für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ ,  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sind vergleichbar, wobei der kleinste Abstand allerdings immer durch unterschiedliche Spektralwertfunktionen vorgegeben wird. Auch wenn jeder Testperson eine oder mehrere individuelle Spektralwertfunktionen zugewiesen werden, können mehrere Testpersonen zu Gruppen zusammengefasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn für mehr als zwei Testpersonen eine Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand  $\Delta \bar{E}_{99}$  bzw. den kleinsten Abstand ergibt. Mögliche Gruppierungen für vergleichbar große Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  sind in Tabelle 15 aufgelistet. Die vollständige Liste für  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ , sowie die Listen für die Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ ,  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  sind im Anhang F in den Tabellen Tabelle 61 und Tabelle 64 zu finden.

Tabelle 15: Mögliche Gruppierungen von Testpersonen. Mit einer Signifikanz von 2,5 % ergeben sich vergleichbar große Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ . In dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn eine Spektralwertfunktion mehr als zwei Testpersonen zugewiesen werden kann.

Nr.	Spektralwertfunktion	TP1	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
1	F. H. C. Marriott	X			X			X	
2	R. N. Wilson			X	X	X		X	
3	E. M. Kinrade			X	X			X	
4	E. M. Love	X			X			X	
5	J. Woodhouse	X			X			X	
6	W. D. Wright					X	X		X

Der Tabelle 16 ist zu entnehmen, ob dieselben Funktionen für die individuellen Testpersonen auch den kleinsten Abstand berechnen. Die mit einer „1“ markierten Felder zeigen, welche Funktion den kleinsten Wert berechnet. Wenn die Felder mit einer „2“ markiert sind, haben die Spektralwertfunktionen zwar einen größeren mittleren Abstand ergeben, allerdings kann aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle nicht davon ausgegangen werden, dass dies auch statistisch gesichert ist (siehe auch Abbildung 80).

Tabelle 16: Funktionen, die für die verschiedenen Testpersonen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % den minimalen Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  berechnen.

Nr.	Spektralwertfunktion	TP1	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
1	F. H. C. Marriott	1			1			2	
2	R. N. Wilson		1	1	2	2		2	
3	E. M. Kinrade			2	2			1	
4	E. M. Love	2			2			2	
5	J. Woodhouse	2			2			2	
6	W. D. Wright		2		2	1		2	

Tabelle 15 und Tabelle 16 zeigen größtenteils eine Übereinstimmung zwischen der Gruppierung für denselben bzw. den minimalen Abstand, d.h. die Spektralwertfunktion ergibt für die Testpersonen dieser Gruppierung auch den geringsten Abstand. Es gibt allerdings einzelne Ausnahmen. Testperson TP4 kann z.B. keiner Gruppe zugeordnet werden, hat aber minimale Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  bei den Funktionen von R.N.Wilson und W.D.Wright. Der Wert der Testperson TP4 liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % über den Abständen der anderen Testpersonen und es kommt daher zu keiner signifikanten Überlappung der Konfidenzintervalle. Die Testperson 12 dagegen kann zwar der Gruppe 6 zugewiesen werden, hat aber bei keiner der angegebenen Spektralwertfunktionen ihren minimalen Abstand.

Die Anzahl an Spektralwertfunktionen, die einer Testperson zugeordnet werden können, ist abhängig von der Einstellung des Lichtspektrums. Die Testpersonen TP6 und TP9, denen für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  eine größere Anzahl an Funktionen zugewiesen wird, haben für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  nur noch drei bis vier Funktionen. Dabei hat der spektrale Verlauf einen größeren Einfluss auf die Anzahl als die Farbtemperatur. Im Vergleich zu den RGB-Mischungen können für die RGBW-Mischspektren den Testpersonen zwei bis dreimal so viele Funktionen zugewiesen werden.

#### 4.1.6 Intrapersonelle Betrachtung der Normspektralwertfunktionen anhand der modifizierten Funktionen

Eine weitere Möglichkeit, die individuelle Wahrnehmung zu berücksichtigen, ist die Zuweisung der modifizierten Normspektralwertfunktion aus Abschnitt 4.1.4. Schanda et.al. hatten bereits bei der Verschiebung der  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurven von Stockmann  $10^\circ$  zu den kürzeren Wellenlängen einer Verbesserung des Abstandes zwischen zu vergleichenden Lichtquellen festgestellt [55]. Die bisherigen Ergebnisse dieser Arbeit weisen auf starke intrapersonelle Unterschiede bei der Berechnung der Farbabstände hin. Im Folgenden werden die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  Kurven den individuellen Ergebnissen der Testpersonen zugeordnet. Es werden diejenigen Modifikationen gesucht, die für möglichst viele Testpersonen den kleinsten Abstand  $\Delta\bar{E}_{99}$  berechnet. Diese Vorgehensweise soll am Beispiel der 5200 K-Einstellungen aufgezeigt werden.

Es wird von elf Testpersonen ausgegangen, von denen jede den Versuch für die 5200 K Einstellung vier- bis sechsmal durchgeführt hat. Für die individuellen Abstände der einzelnen Testpersonen wird von einem 95 %- Konfidenzintervall ausgegangen (Anhang F in den Tabellen Tabelle 65 bis Tabelle 68). Im Folgenden werden mögliche Gruppierungen am Beispiel der mittleren Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  vorgestellt. Unter Verwendung derselben Spektralwertfunktionen werden die Testpersonen in Gruppen unterteilt. Weitere mögliche Gruppierungen finden sich im Anhang im Abschnitt F. Es ist anzumerken, dass die Gruppierungen in den Tabellen nur aussagen, bei welchen Funktionen für die verschiedenen Testpersonen vergleichbare Abstände berechnet werden. Individuell können andere Spektralwertfunktionen für die jeweiligen Testpersonen kleinere Abstände ergeben.

Tabelle 17 zeigt für den mittleren Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  eine mögliche Gruppierung. Der Abstand hat für die Testpersonen TP1, TP5, TP6, TP8 und TP9 mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % vergleichbare Werte.

Tabelle 17: Auswahl der modifizierten Spektralwertfunktionen, denen für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  die jeweiligen Testpersonen zugewiesen werden können. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

	TP1	TP2	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
$\bar{x}_{10}(\lambda+1nm)$	X		X	X		X	X	

Ein Vergleich mit Tabelle 65 zeigt, dass für die Testpersonen dieser Gruppierung die Verschiebung der Spektralwertfunktion  $\bar{x}_{10}(\lambda)$  um 1 nm den kleinsten Abstand ergibt. Die einzige Ausnahme bildet die Testperson 8, für die eine Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve den kleinsten Abstand berechnet.

Tabelle 18 zeigt mögliche Gruppierungen für den mittleren Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Innerhalb einer Gruppierung haben die Testpersonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % vergleichbar große Abstände.

Tabelle 18: Auswahl der Testpersonen, für die sich für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion ein vergleichbarer Abstand errechnet. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

Nr.	Verschiebung	TP1	TP2	TP4	TP5	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
1	$\bar{x}_{10}(\lambda-1\text{nm})$		X		X		X	X	X	
2	$\bar{y}_{10}(\lambda+4\text{nm})$			X	X			X		X
3	$\bar{y}_{10}(\lambda+5\text{nm})$		X	X	X			X		X
4	$\bar{y}_{10}(\lambda+6\text{nm})$		X	X	X			X	X	X
5	$\bar{z}_{10}(\lambda-3\text{nm})$	X		X	X	X	X			
6	$\bar{z}_{10}(\lambda-2\text{nm})$			X		X		X		X

Der Vergleich mit Tabelle 17 zeigt, dass die Spektralwertfunktionen einer Gruppierung nicht einheitlich mit den minimalen Abständen der einzelnen Testpersonen übereinstimmen.

Tabelle 19 verdeutlicht diesen Unterschied. Zu sehen ist, welche der Spektralwertfunktionen für die verschiedenen Testpersonen den minimalen Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  berechnen.

Tabelle 19: Auswahl der Funktionen für  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , die für die verschiedenen Testpersonen den minimalen Abstand berechnen. Die mit einer „1“ markierten Felder zeigen, welche Funktion den kleinsten Wert berechnet. Wenn die Felder mit einer „2“ markiert sind, weist dies auf die Spektralwertfunktionen hin, für welche die entsprechenden Abstände größer sind. Allerdings können diese aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle ähnliche Werte wie die optimale Spektralwertfunktion berechnen

Nr.	Verschiebung	TP1	TP2	TP4	TP5	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
1	$\bar{x}_{10}(\lambda-1\text{nm})$		2					2	2	
2	$\bar{y}_{10}(\lambda+4\text{nm})$		2		2			2	2	
3	$\bar{y}_{10}(\lambda+5\text{nm})$		2		2			2	2	
4	$\bar{y}_{10}(\lambda+6\text{nm})$		2		2			2	2	
5	$\bar{z}_{10}(\lambda-3\text{nm})$	<b>1</b>	<b>1</b>		2	2	2	2	2	
6	$\bar{z}_{10}(\lambda-2\text{nm})$	2	2		2		2	<b>1</b>	2	

In Gruppe 5 haben die Testpersonen TP1, TP4, TP5, TP7 und TP8 bei einer Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ - Kurve um -3 nm vergleichbar große Abstände (Tabelle 18). Ein Vergleich mit Tabelle 19 bestätigt, dass diese Verschiebung auch für die Testpersonen TP1, TP5 TP7 und TP8 den geringsten Abstand ergibt. Allerdings ist die Zelle für die TP4 nicht markiert, d.h. für TP4 führt eine andere Modifikation zu einer Verringerung des Abstandes. Des Weiteren geht aus Tabelle 19 hervor, dass die Testpersonen TP2, TP9 und TP12 für dieselbe Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve ebenfalls einen minimalen Abstand haben. Da sie aber nicht in Gruppe 5 aus Tabelle 18 aufgelistet sind, kann davon ausgegangen werden, dass der Abstand mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % über den Werten dieser Gruppierung liegt.

Bei dem Vergleich der RGB-Einstellung mit der RGBW-Einstellung fällt die Anzahl der möglichen Gruppierungen auf. Während für die RGB-Einstellung nur eine Gruppe mit mehr als zwei Testpersonen gebildet werden kann, existieren für die RGBW-Einstellung mehrere Gruppen. Aus den vorliegenden Ergebnissen kann keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, welche Verschiebungen zu einer Verringerung des Abstandes führen.

## 4.2 Bewertung von alternativen Funktionen und Methoden zur Berechnung des Farbabstandes

Die bisherigen Berechnungen basieren auf den Methoden und Funktionen, wie sie in den Normen und Standards beschrieben sind [38], [39], [50], [51]. In den folgenden Abschnitten werden einige alternative Ansätze zur Minimierung des Abstandes zwischen den Farbtönen der Referenzen und den entsprechenden RGB- bzw. RGBW-Einstellungen behandelt.

### 4.2.1 Analyse des Farbabstandes unter der Verwendung der modifizierten $\bar{l}_{10}(\lambda)$ , $\bar{m}_{10}(\lambda)$ , $\bar{s}_{10}(\lambda)$ - Spektralwertfunktionen

Die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Normspektralwertfunktionen basieren auf den  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven, welche die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Sehapparates beschreiben. Der folgende Abschnitt befasst sich mit den  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven, wie sie im Abschnitt 2.3.1 beschrieben sind. Es wird überprüft, ob die Verwendung dieser Kurven zu einer besseren Übereinstimmung des instrumentellen und visuellen Abgleiches führt. Die Schritte zur Berechnung des Abstandes  $\Delta\bar{l}\bar{m}$  werden in den Abschnitten 0 und 2.3.8 beschrieben. Wie in den Abschnitten 4.1.4 und 4.1.6 werden durch die Verschiebung der Originalfunktionen diverse Varianten erstellt. Für die Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit sind die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven jeweils in 1 nm nach links und rechts von ihrer Originalposition bis zu einem Maximum von 6 nm verschoben (Abbildung 81).

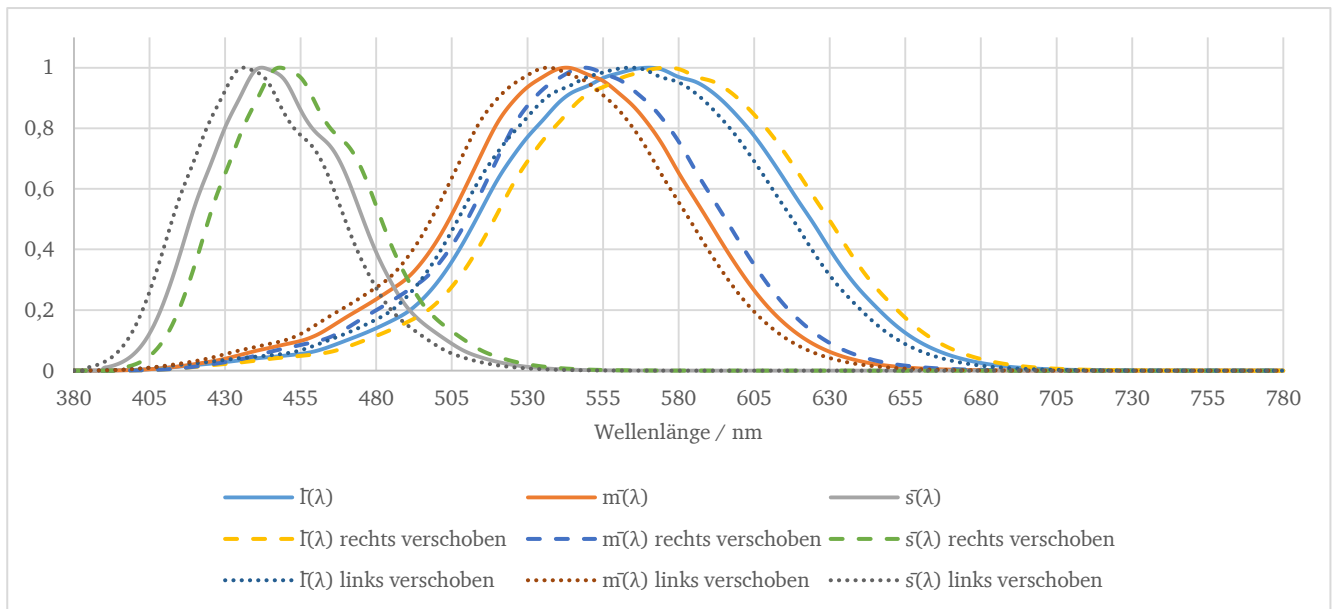


Abbildung 81:  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ - Kurven. Die gestrichelten Linien zeigen die Verschiebungen der Originalkurven um 6 nm nach rechts, die gepunkteten Linien um 6 nm nach links verschoben.

Sofern nicht anders angegeben, wird für die mittleren Abstände  $\Delta lm$  von einem 95 %- Konfidenzintervall ausgegangen. Für beide Farbtemperaturen wird der Versuch von jeweils elf Testpersonen durchgeführt. Für die 5200 K-Einstellungen wurde der Versuch von jeder Testperson vier bis sechsmal durchgeführt, für die 2700 K-Einstellungen zwei bis dreimal.

Für jede der einzelnen Testpersonen wird für die verschiedenen Varianten der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ - Kurven der Abstand  $\Delta\bar{m}$  berechnet. Wie im Abschnitt 4.1.6 soll auch hier gezeigt werden, für welche Varianten sich für die Testpersonen Gruppierungen bilden lassen und welche Varianten für die einzelnen Testpersonen den kleinsten Abstand  $\Delta\bar{m}$  berechnen. Einige mögliche Gruppierungen sollen am Beispiel der RGB 5200 K-Einstellungen vorgestellt werden. Die Ergebnisse der Gruppierungen der Abstände  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGBW}$ ,  $\Delta\bar{m}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{m}_{2700K}^{RGBW}$  sowie die individuellen minimalen Abstände sind im Abschnitt H zu finden. Die Tabelle 20 zeigt für den Abstand  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGB}$  mögliche Gruppierungen an Testpersonen.

Tabelle 20: Abstände  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGB}$  der modifizierten Spektralwertfunktionen für die jeweiligen Testpersonen. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Signifikanz von 2,5 % einen gleich großen Abstand berechnet.

Nr.	Verschiebung	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
1	$\bar{l}_{10}(\lambda)$ $\bar{m}_{10}(\lambda)$ $\bar{s}_{10}(\lambda)$						X				
2	$\bar{m}_{10}(\lambda - 3 \text{ nm})$		X					X		X	
3	$\bar{m}_{10}(\lambda - 2 \text{ nm})$	X						X			
4	$\bar{m}_{10}(\lambda - 1 \text{ nm})$				X	X	X		X		
5	$\bar{s}_{10}(\lambda + 6 \text{ nm})$						X		X		

Man kann aus der Tabelle erkennen, dass sich für die Originalkurven keine Gruppierungen bilden lassen. Erst die Verschiebungen der  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  zu den kürzeren Wellenlängen liefern für mehrere Testpersonen mögliche Gruppierungen.

Tabelle 21 zeigt, ob die Verschiebungen auch einen minimalen Abstand berechnen. Die mit einer „1“ markierten Felder zeigen, welche Funktion für die jeweiligen Testpersonen den kleinsten Wert berechnet. Felder, die mit einer „2“ markiert sind, weisen zwar auf Spektralwertfunktionen hin, welche für die entsprechenden Testpersonen einen größeren Abstand haben können, aber aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle vergleichbare Werte liefern, die sich den Ergebnissen der optimalen Spektralwertfunktion nähern.

Tabelle 21: Die  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGB}$  Funktionen, die für die verschiedenen Testpersonen den minimalen Abstand berechnen.

Nr.	Verschiebung	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
1	$\bar{l}_{10}(\lambda)$ $\bar{m}_{10}(\lambda)$ $\bar{s}_{10}(\lambda)$			2			2				2
2	$\bar{m}_{10}(\lambda - 3 \text{ nm})$		1					2		2	
3	$\bar{m}_{10}(\lambda - 2 \text{ nm})$	1	2	2				1	2		2
4	$\bar{m}_{10}(\lambda - 1 \text{ nm})$	2		1	1	1	1		1		1
5	$\bar{s}_{10}(\lambda + 6 \text{ nm})$						2		2		

Die Originalkurven ergeben nur für Testperson TP7 einen geringsten Abstand  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGB}$ . Bei dem Vergleich der beiden Tabellen erkennt man die Übereinstimmung bei der Zuweisung der optimalen Kurven und der Einteilung in die entsprechende Gruppierung. In Gruppe 4 z.B. haben die Testpersonen TP5, TP6, TP7 und TP9 bei der Verwendung der  $\bar{m}_{10}(\lambda - 1 \text{ nm})$ -Kurve einen minimalen Abstand. Des Weiteren weisen die Testpersonen TP1, TP4 und TP13 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,5 % ebenfalls einen minimalen Abstand auf. Für die Abstände  $\Delta\bar{m}_{5200K}^{RGBW}$  und  $\Delta\bar{m}_{2700K}^{RGBW}$  ergeben sich vergleichbare Ergebnisse. Gruppierungen unterscheiden sich nur hinsichtlich der angewandten Spektralwertfunktionen. Eine Ausnahme bilden die Abstände  $\Delta\bar{m}_{2700K}^{RGB}$ , für die sich keine Gruppen finden lassen. Wie im Abschnitt 4.1.6 ist für die



RGB-Einstellung die Anzahl der möglichen Modifikationen, für die sich Gruppierungen finden lassen, geringer als für die RGBW-Einstellungen.

#### 4.2.2 Einfluss der chromatischen Adaptation auf den visuellen Abgleich unterschiedlicher Lichtquellen

Bei den in den Normen beschriebenen Berechnungsmethoden geht man von einer Unabhängigkeit zwischen den Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  bzw. der  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ -Funktionen und den unterschiedlichen Lichtspektren aus. Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen sollten folglich unterschiedliche Lichtspektren mit demselben Farbort für unterschiedliche Testpersonen denselben Farbeindruck ergeben.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte zeigen allerdings für die unterschiedlichen Lichtspektren RGB und RGBW sowie die jeweiligen Farbtemperaturen 2700 K bzw. 5200 K und unter Verwendung derselben Normspektralwertfunktionen unterschiedliche Abstände zwischen den Referenzlichtquellen und den entsprechenden Vergleichslichtquellen. Dieser Effekt weist darauf hin, dass die chromatische Adaptation von den bisherigen Modellen nur ungenügend berücksichtigt wurde.

In diesem Abschnitt werden den verschiedenen Lichtspektren unterschiedliche  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Spektralwertfunktionen zugeordnet. Dieses Verfahren unterscheidet sich von dem klassischen Ansatz, bei dem unterschiedliche Spektren mit derselben Spektralwertfunktion bewertet werden. Jede der elf Testpersonen, die an diesem Test teilgenommen hat, hat den Versuch mindestens vier bis sechsmal wiederholt.

Die Formeln (90) bis (98) zeigen die Rechenschritte am Beispiel der 5200 K RGB-Einstellung. Die Größen der Testlichtquelle  $\bar{l}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB}$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB}$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB}$  werden den Größen der Referenzlichtquelle  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$  gleichgesetzt. Die Stimuli der RGB-Einstellungen werden jeweils mit einem Vorfaktor  $k$  multipliziert (Formeln (90) bis (92)).

$$\bar{l}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} = k_l \cdot \bar{l}_{10}(\lambda) \quad (90)$$

$$\bar{m}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} = k_m \cdot \bar{m}_{10}(\lambda) \quad (91)$$

$$\bar{s}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} = k_s \cdot \bar{s}_{10}(\lambda) \quad (92)$$

Bei dem Vorfaktor  $k$  handelt es sich um eine Variable, mit welcher die Größen  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$  multipliziert werden müssten, um den Farbabstand zwischen den zwei Quellen zu minimieren.

Das Spektrum der Referenzlichtquelle wird mit den Originalkurven multipliziert. Die Vorfaktoren verändern die Amplituden der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven, welche für die jeweiligen Vergleichsspektren unterschiedlich sind. Wenn der Wert des Vorfaktors über dem der Originalkurve liegt, so wird das Vergleichsspektrum von den Originalkurven zu schwach bewertet.



Wenn der Wert darunterliegt, bewerten die Originalkurven dagegen das Vergleichsspektrum zu stark.

Durch Einsetzen in die Formeln (55), (56) und (57) aus Abschnitt 2.3.9 ergeben sich mit dem Lichtspektrum der 5200 K RGB-Einstellung  $I(\lambda)_{5200K}^{RGB}$  die LMS-Farbwerte.

$$L_{5200K}^{RGB} = \int_{380nm}^{780nm} I(\lambda)_{5200K}^{RGB} \cdot \bar{l}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} d\lambda \quad (93)$$

$$M_{5200K}^{RGB} = \int_{380nm}^{780nm} I(\lambda)_{5200K}^{RGB} \cdot \bar{m}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} d\lambda \quad (94)$$

$$S_{5200K}^{RGB} = \int_{380nm}^{780nm} I(\lambda)_{5200K}^{RGB} \cdot \bar{s}_{10}(\lambda)_{5200K}^{RGB} d\lambda \quad (95)$$

Durch Einsetzen der LMS-Farbwerten in die Formeln (58) und (59) aus Abschnitt 2.3.9 werden dementsprechend die l- und m-Farbwertanteile der Lichtquellen berechnet.

$$l_{5200K}^{RGB} = \frac{L_{5200K}^{RGB}}{L_{5200K}^{RGB} + M_{5200K}^{RGB} + S_{5200K}^{RGB}} \quad (96)$$

$$m_{5200K}^{RGB} = \frac{M_{5200K}^{RGB}}{L_{5200K}^{RGB} + M_{5200K}^{RGB} + S_{5200K}^{RGB}} \quad (97)$$

Die Rechenschritte (90) bis (97) werden für die 5200K RGBW-Einstellung wiederholt. Im Anschluss werden die Vorfaktoren verändert, bis die Farbörter der 5200 K Lichtquellen übereinstimmen und der mittlere Abstand zwischen den Farbörtern Null wird (98).

$$\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGB} - \Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGBW} = 0 \quad (98)$$

Dabei sind die Abstände  $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGB}$  bzw.  $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGBW}$  die gemittelten Abstände einer einzelnen Testperson für jeweils fünf bis sechs Wiederholungen. Abbildung 82 zeigt als Beispiel für Testperson TP1 einen vergrößerten Ausschnitt der gemittelten Amplituden der Empfindlichkeitsfunktionen nach einem berechneten Abgleich zwischen den beiden 5200 K-Einstellungen und der 5200 K- Referenz gemäß Formel (98).

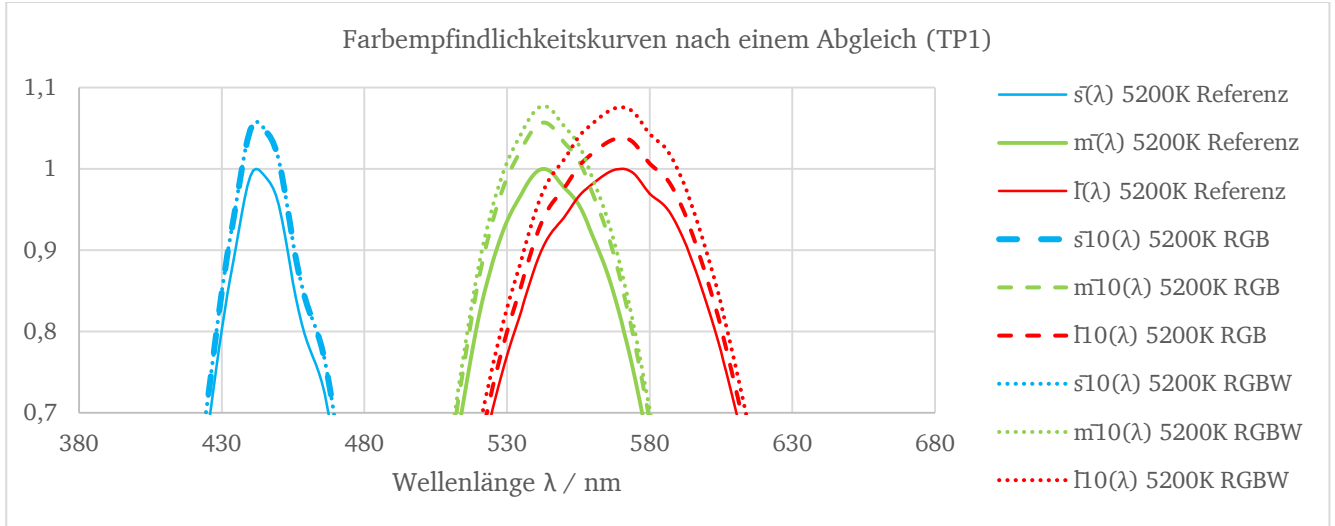


Abbildung 82: Vergrößerter Ausschnitt der Farbempfindlichkeitskurven nach einem Abgleich. Die originalen  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind durch die durchgezogenen Linien dargestellt. Die gestrichelten Kurven sind mit den Vorfaktoren für die 5200 K RGB- Einstellung bewertet. Die gepunkteten Kurven sind mit den Vorfaktoren für die 5200 K RGBW-Einstellung bewertet. Die Testperson (TP1) hat den Abgleich 6-mal durchgeführt.

Für die Testperson TP1 sind die Abweichungen von den Originalkurven bei den jeweiligen Amplituden am stärksten. Die gemittelten Amplituden der  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ - Kurven sind sowohl für die RGB- als auch für die RGBW-Einstellung um 5 % höher als die Originalkurven. Für die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ - und  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  -Kurven erhöht sich die gemittelte Amplitude der RGB-Einstellung um 4 % bis 5 % und bei der RGBW-Einstellung um 7 %.

Im Folgenden wird die Analyse der Amplituden anhand der 5200 K-Einstellungen durchgeführt. Die Ergebnisse der 2700 K-Einstellungen zeigen tendenziell vergleichbare Ergebnisse, allerdings sind diese aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsdurchläufen pro Testperson statistisch unsicherer.

Abbildung 83 zeigt für einige ausgewählte Testpersonen die gemittelten Amplituden sowie die entsprechenden 95 %- Konfidenzintervalle für die RGB-Einstellungen, in relativer Form dargestellt. Die Amplituden der Testpersonen werden gemäß den Formeln (90) bis (92) mit einem Vorfaktor multipliziert. Die Amplituden der Kurven bleiben für die Referenzquelle unverändert und befinden sich für die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven bei 100 %.

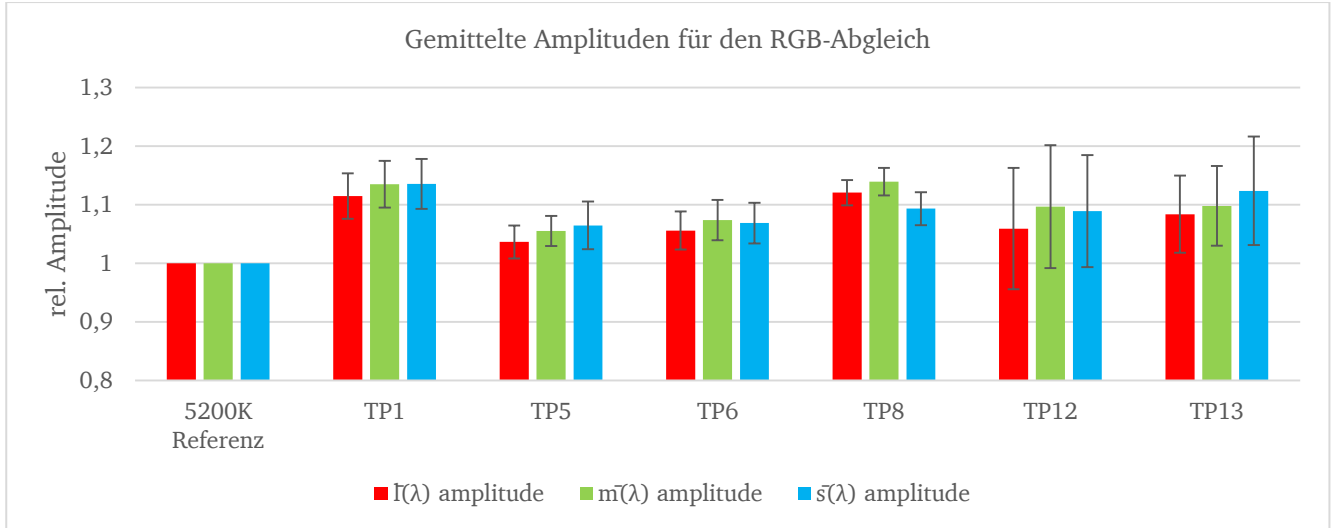


Abbildung 83: Gemittelte Amplituden sowie die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle ausgewählter Testpersonen für den Abgleich zwischen der 5200 K-Referenz und der entsprechenden RGB-Einstellung.

Die gemittelten Amplituden der Testpersonen liegen über den Amplituden der Referenz. Im Mittel ist der Anstieg der Amplitude der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ -Kurve geringer als für die  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Allerdings überschneiden sich die Konfidenzintervalle der einzelnen Kurven bzw. die gemittelten Amplitudenwerte einer Kurve fallen in die Bereiche der Konfidenzintervalle der jeweils anderen beiden Kurven. Es fällt jedoch auf, dass die Ergebnisse von Testperson TP8 von den anderen abweicht. Für diese Testperson kann mit einer 95 % Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass der Amplitudenwert der  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurve kleiner ist als für die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Die Testperson TP12 hat für die Amplituden der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven Abweichungen von 10 %, so dass die Amplitudenwerte der Referenz in deren Konfidenzintervall fallen.

Testperson TP13 hat Konfidenzintervalle mit Abweichungen zwischen 6 % und 10 %, wobei die Amplituden der Referenz nicht in deren Bereiche fallen. Die Testpersonen TP1 und TP8 haben die größten Amplituden. Die  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurve ist für TP8 um etwa 4 % geringer, allerdings überschneiden sich in diesem Fall die Konfidenzintervalle. Testperson TP5 und TP6 haben vergleichbare Amplituden und Konfidenzintervalle mit Abweichungen zwischen 2 % und 4 %.

Zum Vergleich sind hier in Abbildung 84 für einige ausgewählte Testpersonen die gemittelten Amplituden sowie die entsprechenden 95 %-Konfidenzintervalle mit den RGBW-Einstellungen abgebildet.

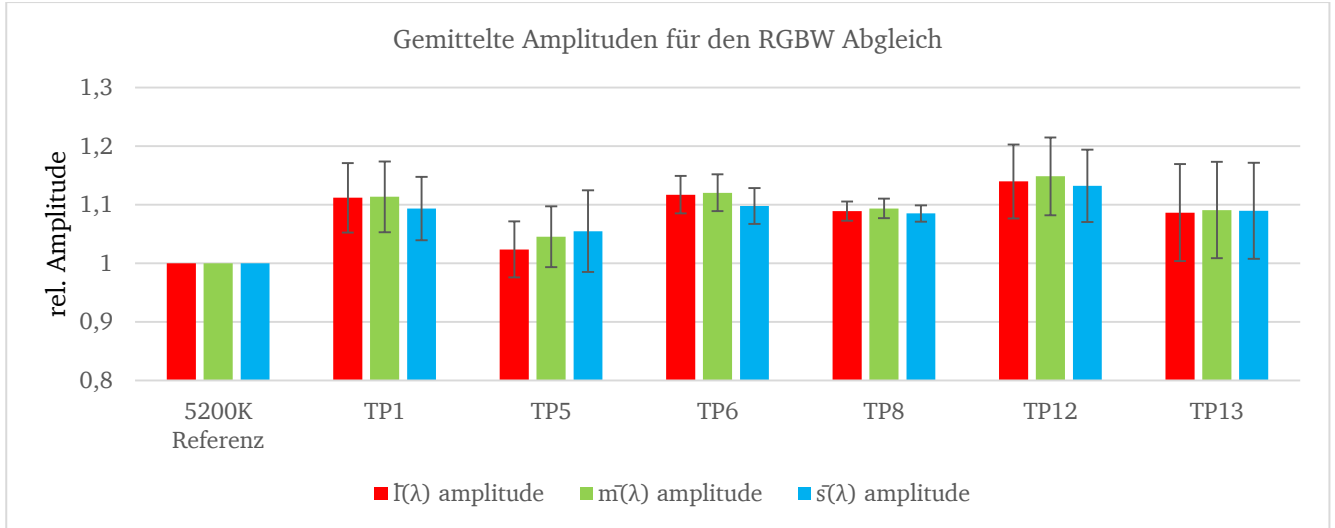


Abbildung 84: Gemittelte Amplituden sowie der entsprechenden 95 %- Konfidenzintervalle ausgewählter Testpersonen für den Abgleich zwischen der 5200 K Referenz und der entsprechenden RGBW Einstellung.

Die gemittelten Amplituden der RGBW-Einstellungen liegen, ähnlich wie beim RGB-Abgleich, über den Amplituden der Referenz. Die Konfidenzintervalle der einzelnen  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven überlappen sich. Die gemittelten Amplitudenwerte einer Kurve fallen in die Bereiche der Konfidenzintervalle der jeweils anderen beiden Kurven. Die Testperson TP5 zeigt bei den Amplituden der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven Abweichungen von 10 % auf, so dass die Amplitudenwerte der Referenz in deren Konfidenzintervall fallen. Die Abweichungen bei der  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurve treten bei dieser Testperson am deutlichsten hervor. Testperson TP13 hat dagegen Konfidenzintervalle mit Abweichungen von nur 8 %, wobei die Amplitudenwerte der Referenz mit den Werten der Untergrenze der Konfidenzintervalle übereinstimmen. Die Testpersonen TP1 und TP6 haben vergleichbar große Amplituden für die  $\bar{l}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven. Dabei sind die Konfidenzintervalle der Testperson TP1 um 3 % größer als bei TP6. Testperson TP12 hat die größten mittleren Amplituden, mit Abweichungen von 6 %.

Für die in dieser Arbeit untersuchten Weißtöne zeigen die Ergebnisse, dass bei einem instrumentellen Abgleich der Farbwerte unterschiedlicher Lichtquellen deren Farborte farblich anders wahrgenommen werden. Die Amplitudenwerte der RGB- und RGBW-Einstellungen sind für die einzelnen Testpersonen vergleichbar groß. Intrapersonell kann keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, welche der beiden Einstellungen nach einem Abgleich zu höheren Amplitudenwerten führt. Für die 5200 K Lichtspektren sind die Amplituden der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$  und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven der RGB- und RGBW-Einstellungen größer als die der Referenz. Dies deutet darauf hin, dass die Originalkurven die 5200 K RGB-Einstellung zu schwach bewerten.

---

## 4.3 Bewertung der inter- und intrapersonellen Streuung nach einem visuellen Abgleich unterschiedlicher Lichtspektren

---

Die Abschnitte 4.1.5 und 4.1.6 zeigen, dass die Wahrnehmung vom Genotypen (siehe auch Abschnitt 2.2) oder anderen Eigenschaften des Sehsystems der Testperson abhängt. Der folgende Abschnitt behandelt die Problematik der Streuung der Ergebnisse der Versuchsgruppe (interpersonell) und der individuellen Streuung der einzelnen Versuchspersonen (intrapersonell) nach einem visuellen Abgleich. Es wird untersucht, wie stark die Farborte der verschiedenen Beobachter voneinander abweichen und wie reproduzierbar die Ergebnisse einer einzelnen Testperson sind. Ziel dieser Vorgehensweise ist, einen Bereich in einem ausgewählten Farbraum zu definieren, indem möglichst alle Testpersonen zwei zu vergleichende Lichtquellen als gleich wahrnehmen. Das Light Research Center hatte in Untersuchungen festgestellt, dass bei einem Vergleich von nebeneinander angeordneten Lichtquellen eine zweifache Standardabweichung zur Beschreibung der MacAdam Ellipsen ausreichend ist [77]. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Berechnung der Bereiche für die ein Farbabweich gefunden wurde deswegen von einer zweifachen Standardabweichung ausgegangen (siehe auch Abschnitt 2.3.4 und 2.4.3).

### 4.3.1 Interpersonelle Streuung nach einem visuellen Abgleich

Die Aufgabe der Testpersonen besteht darin, zwei Lichtquellen mit ähnlicher Farbtemperatur, aber unterschiedlichem Spektrum visuell aufeinander abzugleichen. Im folgenden Abschnitt wird auf die interpersonelle Streuung der Testpersonen hinsichtlich des wahrgenommenen Farbunterschiedes eingegangen. Es soll ein möglicher Bereich identifiziert werden, in dem in Abhängigkeit vom Spektrum ein Farbunterschied zu erkennen ist. Der im Abschnitt 4.1 behandelte Farbunterschied zwischen den Spektren ist für die folgende Untersuchung der Streuung vernachlässigbar. Es ist von Interesse, wie stark die Einstellungen für die verschiedenen Testpersonen nach einem visuellen Abgleich in Abhängigkeit vom vergleichenden Spektrum streuen. Zur Darstellung der Ergebnisse wird der DIN99  $L^*a^*b^*$ -Farbraum verwendet [51], da er die visuelle Gleichabständigkeit gegenüber dem CIELAB-Raum verbessert. Die Verbesserung der Gleichabständigkeit ist allerdings auf kleine Farbabstände ( $\Delta E_{99} < 5$ ) beschränkt (siehe Abschnitt 2.3.6 und 2.3.7). Änderungen entlang der vertikalen Achse führen für positive Werte zur Beeinflussung des Gelbeindrucks, für negative Werte zur Beeinflussung des Blaueindrucks. Verschiebungen entlang der horizontalen Achse beeinflussen den Rot- bzw. Grüneindruck.

Für die interpersonelle Streuung wird eine zweifache Standardabweichung angenommen. Die Kovarianzellipsen (2.4.3) markieren einen Bereich, in dem in 95,4 % der Fälle von einem visuellen Abgleich, bzw. von einem gerade wahrzunehmenden Unterschied zwischen zwei Lichtquellen ausgegangen werden soll. Bei der Berechnung der Ellipsen wird nur berücksichtigt, ob ein farblicher Unterschied bemerkt wurde und nicht welcher Farbton wahrgenommen wurde.

## Abgleich und JND bei den Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K

Bei der Durchführung der Tests bedeutet der Begriff „Abgleich“, dass die zu vergleichenden Lichtquellen nicht voneinander zu unterscheiden sind und „JND“ steht für einen gerade wahrnehmbaren farblichen Unterschied. Im Verlauf der Testreihen hat sich ergeben, dass die Testpersonen Schwierigkeiten hatten einen hundertprozentigen Abgleich zwischen der Referenz und der Testquelle einzustellen. In diesem Abschnitt wird nur der JND-Bereich untersucht. Die Abbildung 85 zeigt die Bereiche, in denen die 5200 K-Referenz (Kompaktleuchtstofflampe) und die 5200 K-RGB bzw. RGBW-Einstellung visuell gerade voneinander zu unterscheiden sind. Zusätzlich zu den Ellipsen sind die Farborte angegeben, bei denen die Beobachter einen farblichen Unterschied wahrzunehmen glauben. Die Punkte innerhalb einer Ellipse wurden von den verschiedenen Testpersonen als visuell abgeglichen beurteilt, bzw. es war ein gerade wahrnehmbarer Unterschied erkennbar.

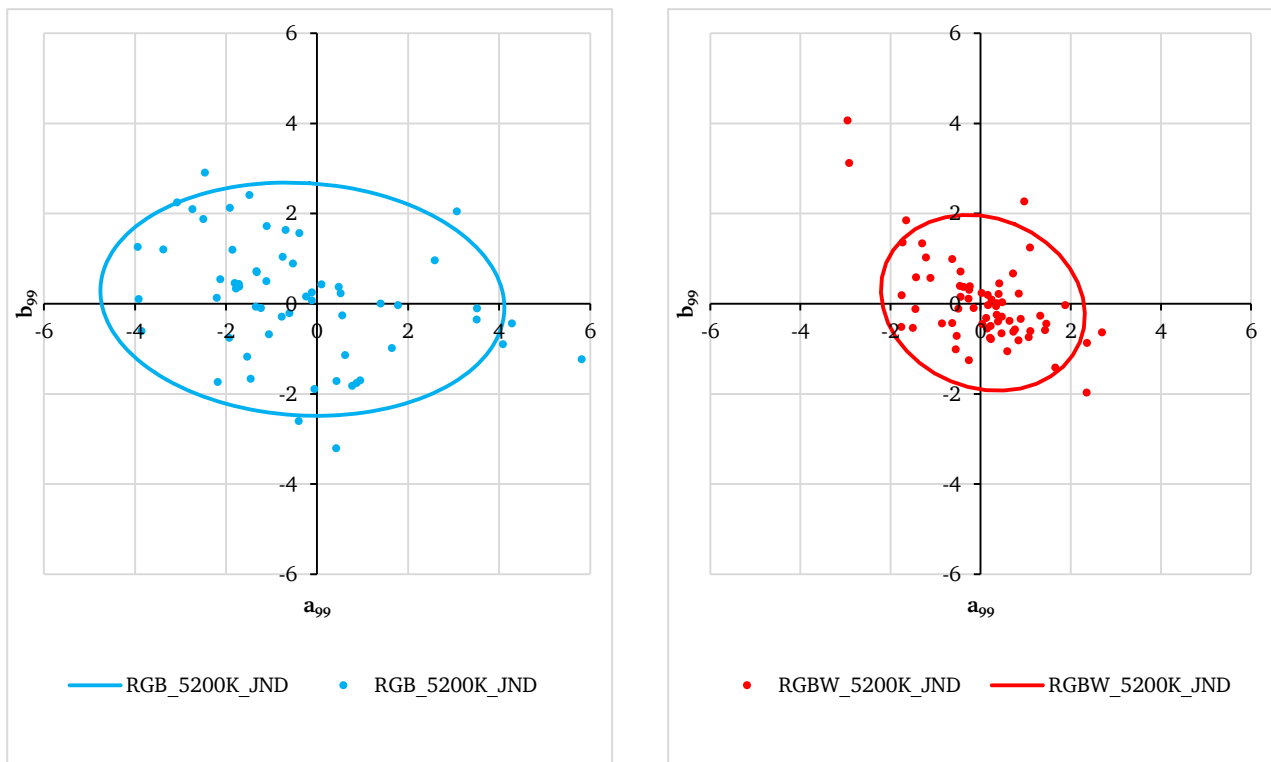


Abbildung 85: Bereiche des gerade wahrnehmbaren Unterschiedes (JND) zwischen der 5200K Referenz und der RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen.

Für die RGB-Einstellung ist die Ellipse entlang der horizontalen Achse gestreckt, d.h. die Testpersonen haben tendenziell Grün und Rot zu dem Testspektrum hinzugemischt bis eine Veränderung gerade erkannt wurde. Für die 5200 K-RGBW Einstellung ist die Ellipse etwa um  $-35^\circ$  zur  $a_{99}$ -Achsen verdreht, d.h. die Testpersonen haben eher Grün-Gelb, bzw. Blau, Violett hinzugemischt. Im Vergleich zur Ellipse der 5200 K RGB-Einstellung ist die Ellipse der 5200 K RGBW-Einstellung kleiner und weniger gestreckt. Die Punkte der RGBW-Einstellung scheinen weniger gestreut. Dies deutet darauf hin, dass die Testpersonen bei einer Lichtquelle

mit einem aufgefüllten Spektrum eher die gleiche Lichtfarbe wahrnehmen als bei einer Lichtquelle, die nur aus drei Farbreizen besteht.

Die Ergebnisse für die 2700 K-Einstellungen deuten auf ein ähnliches Verhalten der Testpersonen hin. Die Abbildung 86 zeigt die Bereiche, in denen die 2700 K-Referenz und die 2700 K RGB- bzw. die RGBW-Einstellung visuell gerade voneinander zu unterscheiden sind.

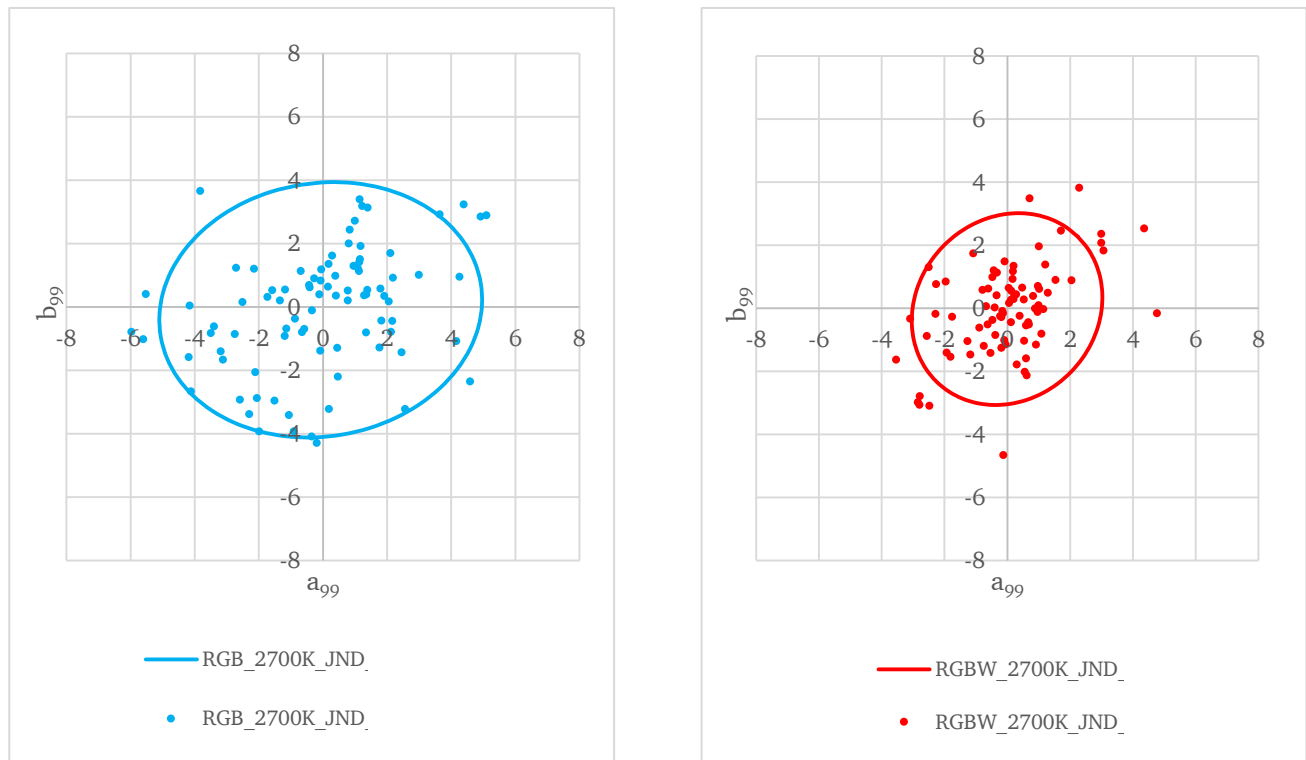


Abbildung 86: Bereich des gerade wahrnehmbaren Unterschiedes (JND) zwischen der 2700 K-Referenz und der RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen.

Wie beim visuellen Abgleiches der 5200 K-Einstellungen, ist der Bereich für die 2700 K RGBW-Einstellung kleiner als für die 2700 K RGB-Einstellung. Die Punkte für den Vergleich der 2700 K-Referenz zu der 2700 K RGBW-Einstellung sind weniger gestreut.

Die Ellipse für den Vergleich 2700 K-Referenz zur 2700 K RGB-Einstellung ist um etwa  $15^\circ$  gedreht und entlang der horizontalen Achse gestreckt, d.h. die Testpersonen haben tendenziell Grün und Rot bzw. Orange zu dem Testspektrum hinzugemischt, bis eine Veränderung gerade als solche erkannt wurde.

Die Ellipse der RGBW-Einstellung ist dagegen etwa um  $45^\circ$  zur  $a_{99}$ -Achsen verdreht, d.h. die Testpersonen haben, ähnlich wie beim vorigen Abgleich, eher Grün bzw. Rot-Orange hinzugemischt um einen visuellen Abgleich zu erreichen.

### JTD bei den Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den gerade tolerierbaren Unterschied „JTD“ vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit bedeutet gerade tolerierbar, dass ein farblicher Unterschied zwischen zwei Lichtquellen zu erkennen ist, aber die Lichtquellen von den Testpersonen gerade noch als ähnlich genug bewertet werden.

Die Abbildung 87 zeigt die Ellipsen für die Sehbedingungen „JND“ und „JTD“ sowie die Punktwolken für die Sehbedingung „JTD“ zwischen der 5200 K-Referenzlichtquelle und der 5200 K RGB- bzw. RGBW-Einstellung.

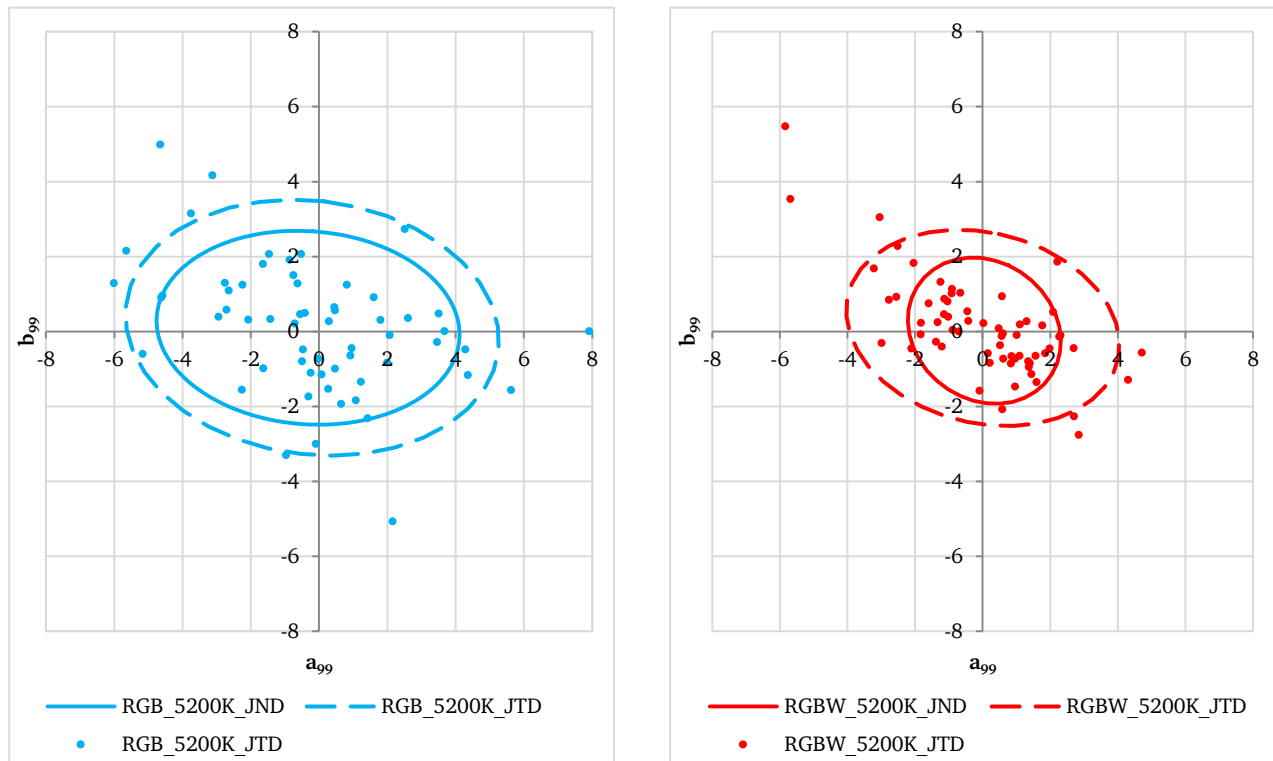


Abbildung 87: Bereiche JND und JTD für die 5200 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen. Zusätzlich sind die Farborte eingezeichnet, an denen von den Testpersonen ein gerade tolerierbarer Unterschied bemerkt wurde.

Die JTD-Ellipse für die 5200 K RGB-Einstellung ist um 38 % größer als die JND-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 20 % größer und entlang der y-Achse um etwa 25 %. Für die 5200 K RGBW-Einstellung wächst die JTD-Ellipse um 55 %, wobei die Standardabweichung der Punkte entlang der x-Achse um etwa 45 %, aber entlang der y-Achse nur um etwa 20 % größer ist. Auffällig für beide Einstellungen ist die Lage der Punkte der „gerade tolerierbaren Unterschiede“. Theoretisch markiert die Fläche zwischen den beiden Ellipsen den Bereich, in dem ein gerade tolerierbarer Unterschied zu erkennen ist. Für den JTD-Abgleich liegen allerdings etwa 75 % der Punkte im Bereich des gerade wahrzunehmenden Unterschieds. Ein vergleichbares Verhalten zeigen die Ergebnisse der JND- und JTD-Ellipsen für die 2700 K-Einstellungen (Abbildung 88).



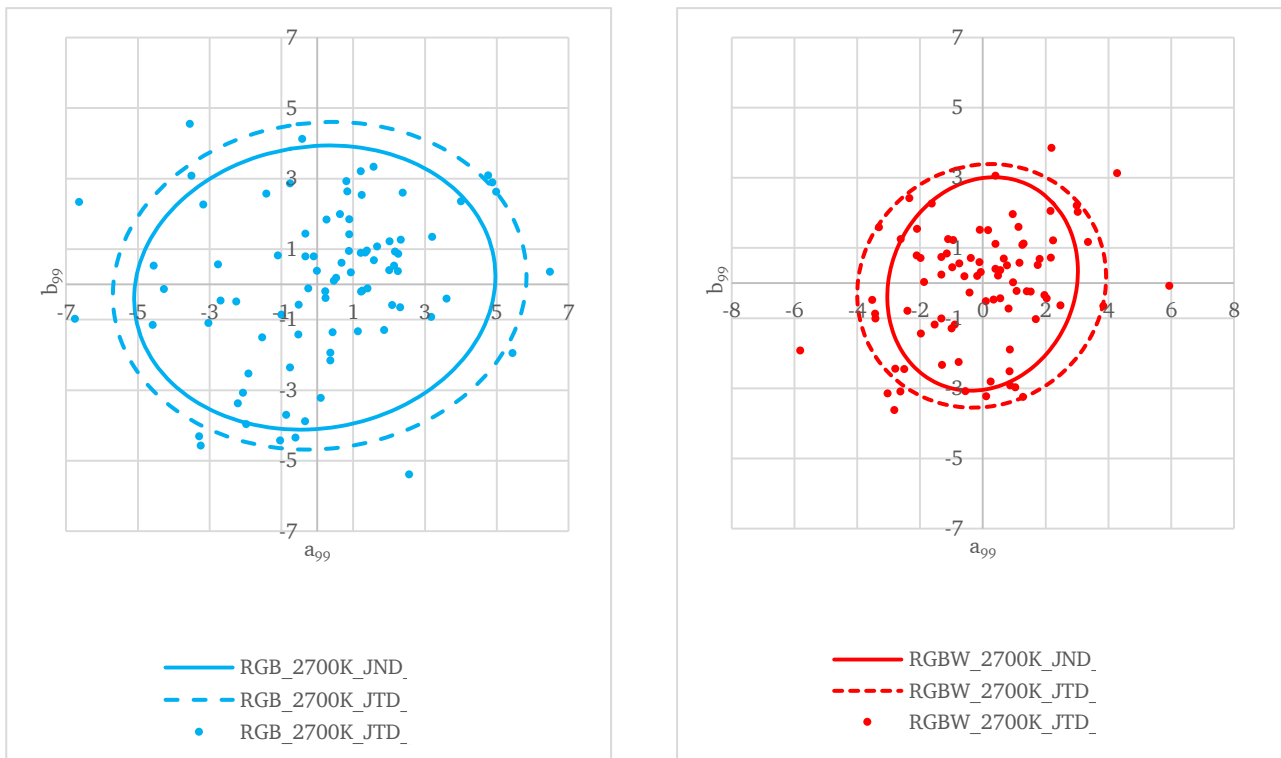


Abbildung 88: Bereiche JND und JTD für die 2700 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen. Zusätzlich sind die Farborte eingezeichnet, an denen von den Testpersonen ein gerade tolerierbarer Unterschied bemerkt wurde.

Die JTD-Ellipse für die 2700 K RGB-Einstellung ist um 25 % größer als die JND-Ellipse. Die Standardabweichungen der Punkte entlang der x-Achse und der y-Achse steigen um etwa 13 % an. Für die 2700 K RGBW-Einstellung ist die JTD-Ellipse um 35 % größer als die JND-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 25 %, entlang der y-Achse um etwa 13 % größer. Die Punkte, an denen ein gerade tolerierbarer Farbunterschied zu sehen sein sollte, fallen zu etwa 80 % innerhalb des Bereiches eines gerade wahrnehmbaren Unterschiedes. Die Ellipsen für den gerade tolerierbaren Farbunterschied sind somit keine Bestätigung dafür, dass die einzelnen Testpersonen in diesem Bereich die zu vergleichenden Lichtquellen als gleich wahrnehmen. Tatsächlich entsteht bei Betrachtung der Ellipsen der Eindruck, dass der gerade tolerierbare Bereich von den einzelnen Testpersonen als gerade wahrnehmbar gewertet wird.

### NTD bei den Farbtemperaturen 2700 K und 5200 K

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den gerade nicht mehr tolerierbaren Unterschied „NTD“ vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit bedeutet NTD, dass ein deutlicher, farblicher Unterschied zwischen zwei Lichtquellen zu erkennen ist, der als „gerade nicht mehr tolerierbar“ eingestuft wird. Ähnlich wie bei dem Vergleich des gerade wahrnehmbaren und des gerade tolerierbaren Unterschiedes liegen die Punkte zum großen Teil im Bereich der kleineren Ellipse und nicht in einem Bereich zwischen den beiden Ellipsen.

Abbildung 89 zeigt die Ellipsen für die Sehbedingungen „JTD“ und „NTD“ sowie die Punktwolke für die Sehbedingung „NTD“ zwischen der 5200 K-Referenzlichtquelle und der 5200 KRGB- bzw. RGBW-Einstellung.

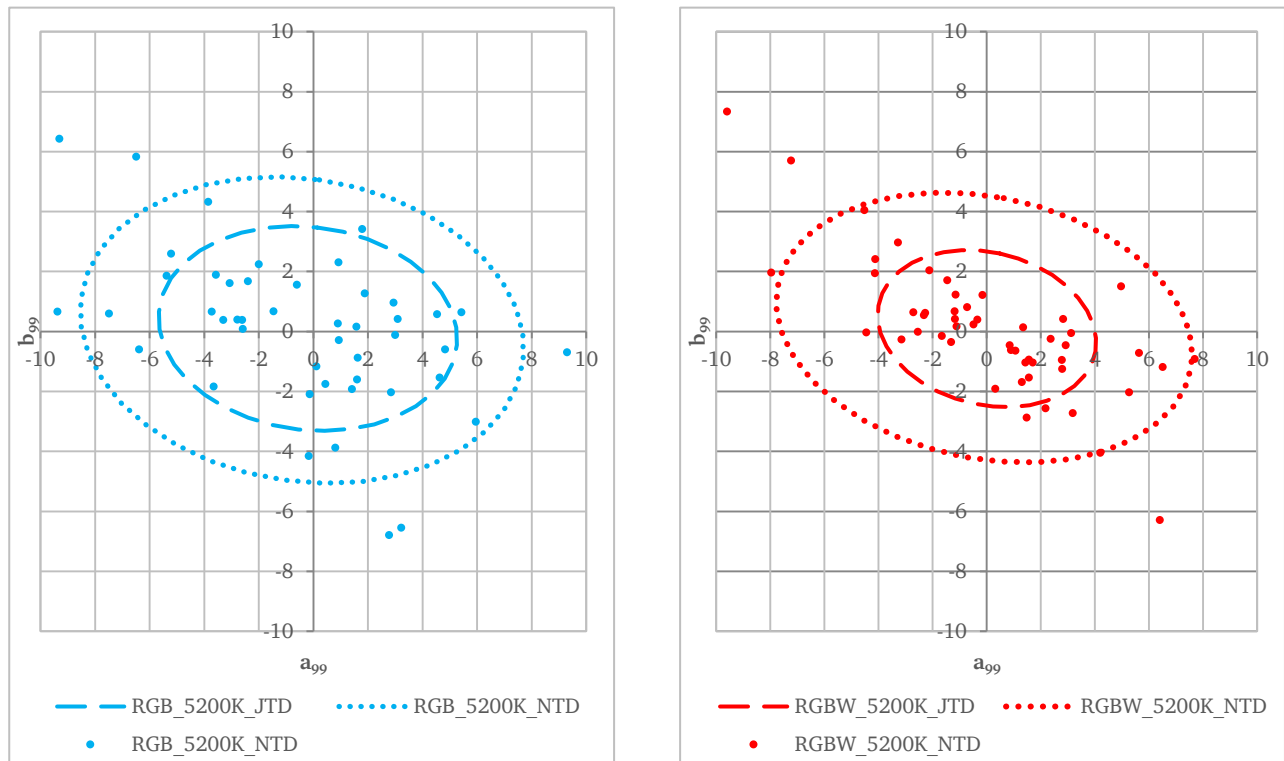


Abbildung 89: Bereiche JTD und NTD für die 5200 K RGB-Einstellung (links) bzw. RGBW-Einstellung (rechts). Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen. Zusätzlich sind die Farborte eingezeichnet, an denen von den Testpersonen ein gerade tolerierbarer Unterschied bemerkt wurde.

Die NTD-Ellipse für die 5200 K RGB-Einstellung ist 52 % größer als die JTD-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 30 % größer und entlang der y-Achse um etwa 32 %. Die NTD-Ellipse für die 5200 K RGBW-Einstellung ist um 70 % größer als die JTD-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 50 % größer und entlang der y-Achse um etwa 42 %.

Die Ergebnisse der JTD- und NTD-Ellipsen für die 2700 K-Einstellungen sind vergleichbar (Abbildung 90). Dabei befinden sich für die RGB-Einstellung etwa 70 % der NTD-Wertungen innerhalb der JTD-Ellipse, während für die RGBW-Einstellungen etwa 60 % der Punkte in die Ellipse fallen. Des Weiteren fallen für die 5200K RGB-Einstellungen etwa 60 % der Punkte, die als NTD gewertet wurden, in den Bereich eines gerade wahrnehmbaren Unterschiedes. Im Fall der 5200K RGBW-Einstellung beträgt die gemeinsame Punktemenge nur etwa 50 %.

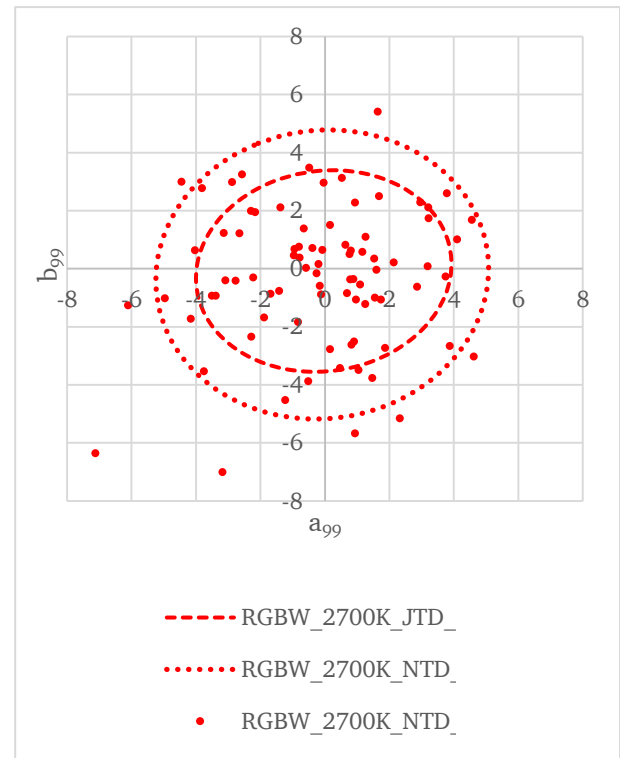
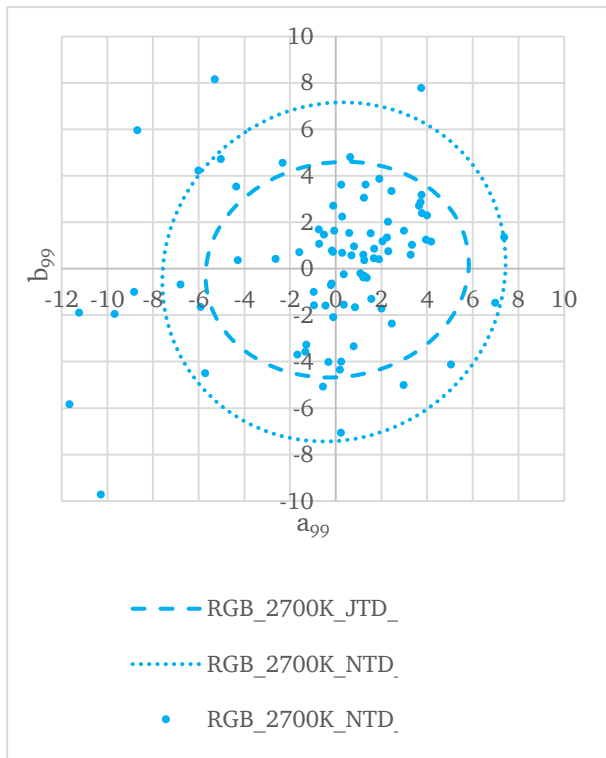


Abbildung 90: Bereiche JTD und NTD für die 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellung. Der Bereich beinhaltet die Ergebnisse von 13 Testpersonen. Die eingezeichneten Punkte sind die Farborte, an denen ein nicht mehr tolerierbarer Unterschied bemerkt wurde.

Die NTD-Ellipse für die 2700 K RGB-Einstellung ist um 51 % größer als die JTD-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 25 % größer und entlang der y-Achse um etwa 38 %. Die NTD-Ellipse für die 2700 K RGBW-Einstellung ist um 47 % größer als die JTD-Ellipse. Die Standardabweichung der Punkte ist entlang der x-Achse um etwa 25 % größer und entlang der y-Achse um etwa 30 %. Für beide Einstellungen sind etwa 80 % im Bereich eines gerade tolerierbaren Unterschiedes. Des Weiteren liegen für die RGB-Einstellung etwa 65 % der als NTD gewerteten Punkte im JND-Bereich, während es für die 2700 K RGBW-Einstellung etwa 70 % sind.

Ähnlich wie bei den Ergebnissen für den gerade tolerierbaren Unterschied, fallen viele der als nicht mehr tolerierbar gewerteten Einstellungen in den gerade tolerierbaren Bereich. Sie sind keine Bestätigung dafür, dass die einzelnen Testpersonen die zu vergleichenden Lichtquellen ähnlich wahrgenommen haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass, je größer die Streuung ist, desto größer auch der wahrgenommene Unterschied zwischen den Testpersonen ist. Somit ist eine rein interpersonelle Betrachtung unter Vernachlässigung des intrapersonellen Einflusses für die Beurteilung eines bestimmten Farbeindrucks bzw. Farbunterschiedes in einem gegebenen Farbraum ungeeignet.

### 4.3.2 Intrapersonelle Streuung nach einem visuellen Abgleich

Die Abschnitte 4.1.5 und 4.1.6 sowie der Abschnitt 4.3.1 zeigen starke Unterschiede bei der Wahrnehmung der einzelnen Testpersonen. Zwei Lichtquellen, die z.B. von einer Testperson A als gleich bewertet werden, können für eine Testperson B einen gerade wahrnehmbaren Unterschied aufweisen. Um die Bereiche der jeweiligen Sehaufgaben definieren zu können, reicht es nicht, die Einstellungen der verschiedenen Testpersonen zusammenzufassen.

Im folgenden Abschnitt wird die Schnittmenge der Ergebnisse der individuellen Testteilnehmer betrachtet. Die Schnittmenge markiert den Bereich, in dem die jeweiligen Sehbedingungen erfüllt sind. Am Beispiel ausgewählter Testpersonen wird ein möglicher Bereich identifiziert, in dem die jeweiligen Testpersonen in Abhängigkeit vom Spektrum einen gerade wahrnehmbaren Farbunterschied (JND) erkennen. Bei den Ellipsen wird von einer zweifachen Standardabweichung ausgegangen. Für die 5200 K-Einstellungen hat jede Testperson den Versuch mindestens vier bis sechsmal wiederholt und für die 2700 K-Einstellung etwa zwei bis dreimal.

#### Betrachtung der Ergebnisse der individuellen Testpersonen

Abbildung 91 zeigt für ausgewählte Testpersonen die individuellen Punktwolken sowie deren Ellipsen, für welche bei der 5200 K RGB-Einstellung ein „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ zu erkennen ist. Zusätzlich eingezeichnet ist die JND-Ellipse, die auf der interpersonellen Streuung des vorangehenden Abschnitts basiert.

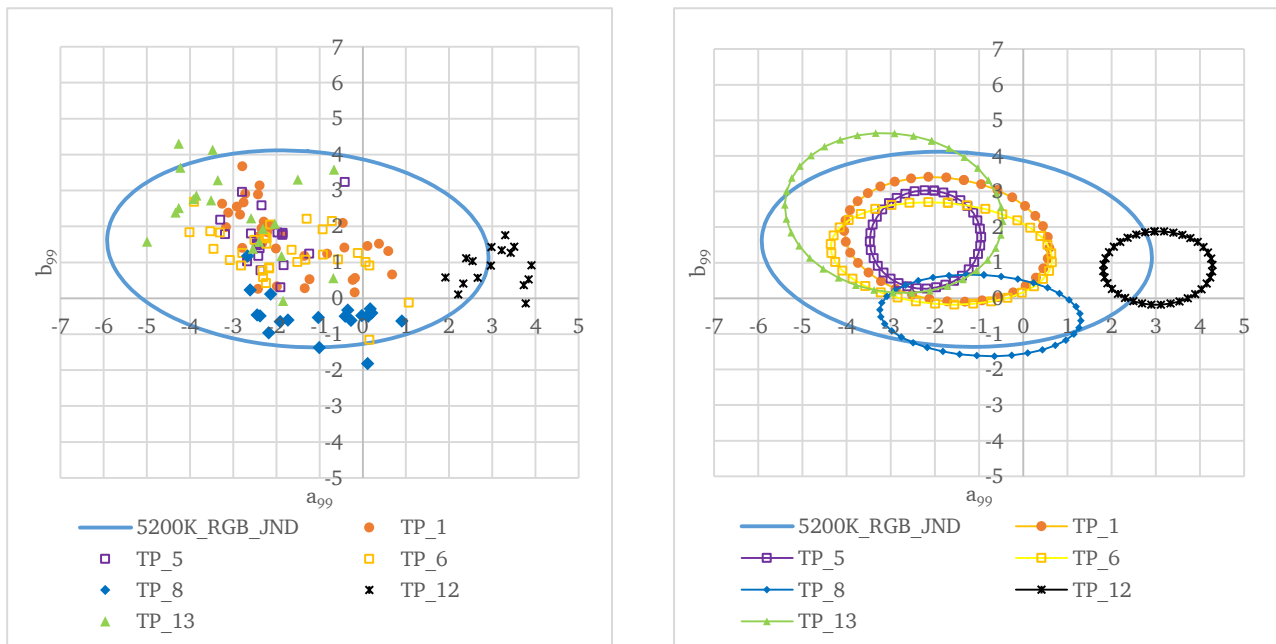


Abbildung 91: Individuelle Punktwolken (links) und Kovarianzellipsen (rechts) für die Sehbedingung JND für die 5200 K RGB-Einstellung. Jeder Testperson ist eine eigene Markierung zugeordnet.

Man kann auf dieser Abbildung die starke intrapersonelle Streuung zwischen den Testpersonen erkennen. Allerdings hat jede Testperson tendenziell zu unterschiedlichen Zeiten bei jedem Abgleich immer dieselben Farbtöne gemischt (siehe hierzu auch die Abschnitte 4.1.5 und 4.1.6). Die individuellen Farbörter befinden sich zum größten Teil innerhalb der JND-Ellipse,

wobei es hinsichtlich der Farbeindrücke der Testpersonen vereinzelt zu Überschneidungen kommen kann. Allerdings ist keine generelle Übereinstimmung erkennbar. So haben die Testpersonen 1 und 6 ähnlich große Bereiche und einen ähnlichen Farbton wahrgenommen, so wie auch die Testperson 13, nur sind deren Punkte weiter zum Grünlichen verschoben. Die Testperson 5 hat eine vergleichsweise kleine Ellipse, die nahezu vollständig von den Ellipsen der Testpersonen 1, 6 und 13 umschlossen wird. Die Testpersonen 8 und 12 haben entweder keine oder nur sehr geringe Überschneidungen mit den restlichen Testpersonen. Während die Punkte von Testperson 8 eher zum Bläulichen verschoben sind, verschieben sich die Punkte von Testperson 12 ins Rötliche.

Abbildung 92 zeigt für die 5200 K RGBW-Einstellung die einzelnen Punktwolken sowie deren Ellipsen für den JND-Bereich.

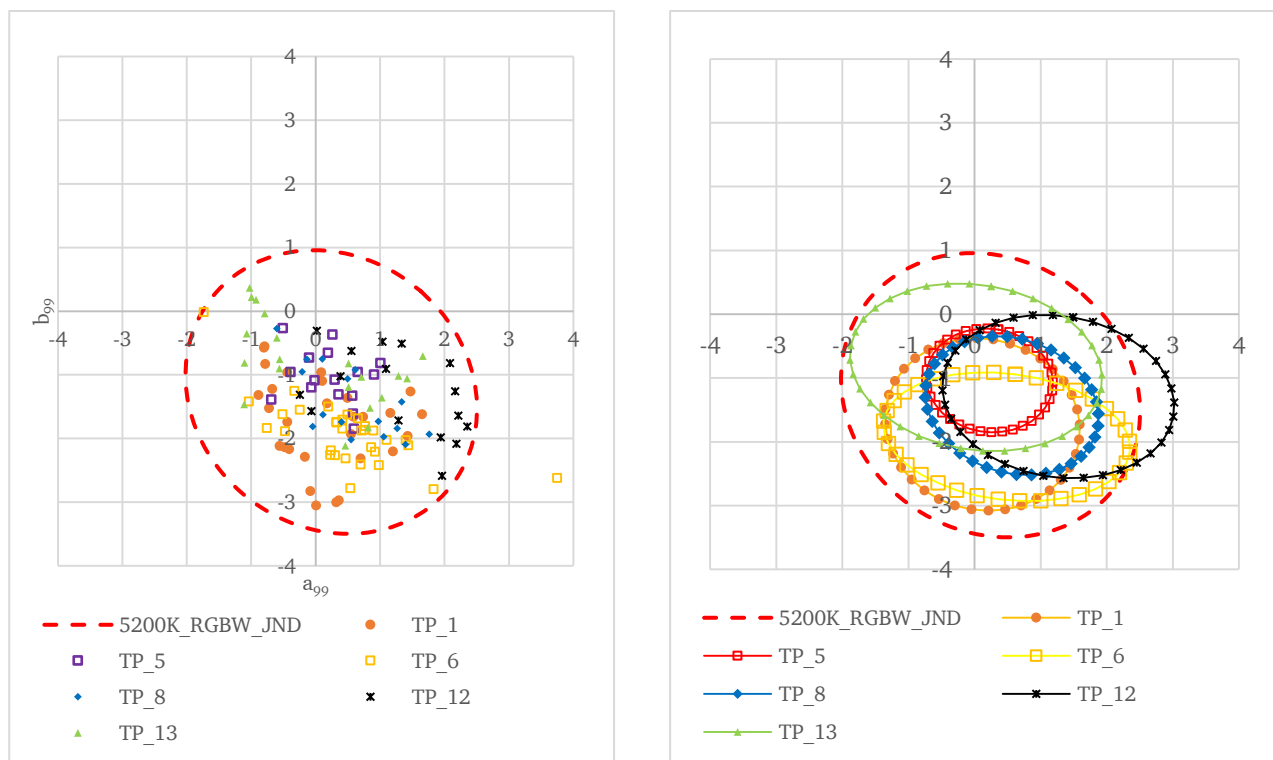


Abbildung 92: Individuelle Punktwolken (links) und Ellipsen (rechts) für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 5200 K-Referenz und 5200 K RGBW-Einstellung.

Wie für den RGB- Bereich sind auch hier intrapersonelle Streuungen vorhanden. Allerdings liegen die Ellipsen und Punkte näher zusammen, so dass es zu einer stärkeren Überschneidung zwischen den individuellen Ellipsen kommt. Insgesamt sind die Ellipsen der Testpersonen in den blau-roten Bereich verschoben.

Die Ergebnisse der 2700 K-Einstellungen sind vergleichbar mit denen der 5200 K-Einstellungen (Abbildung 93).

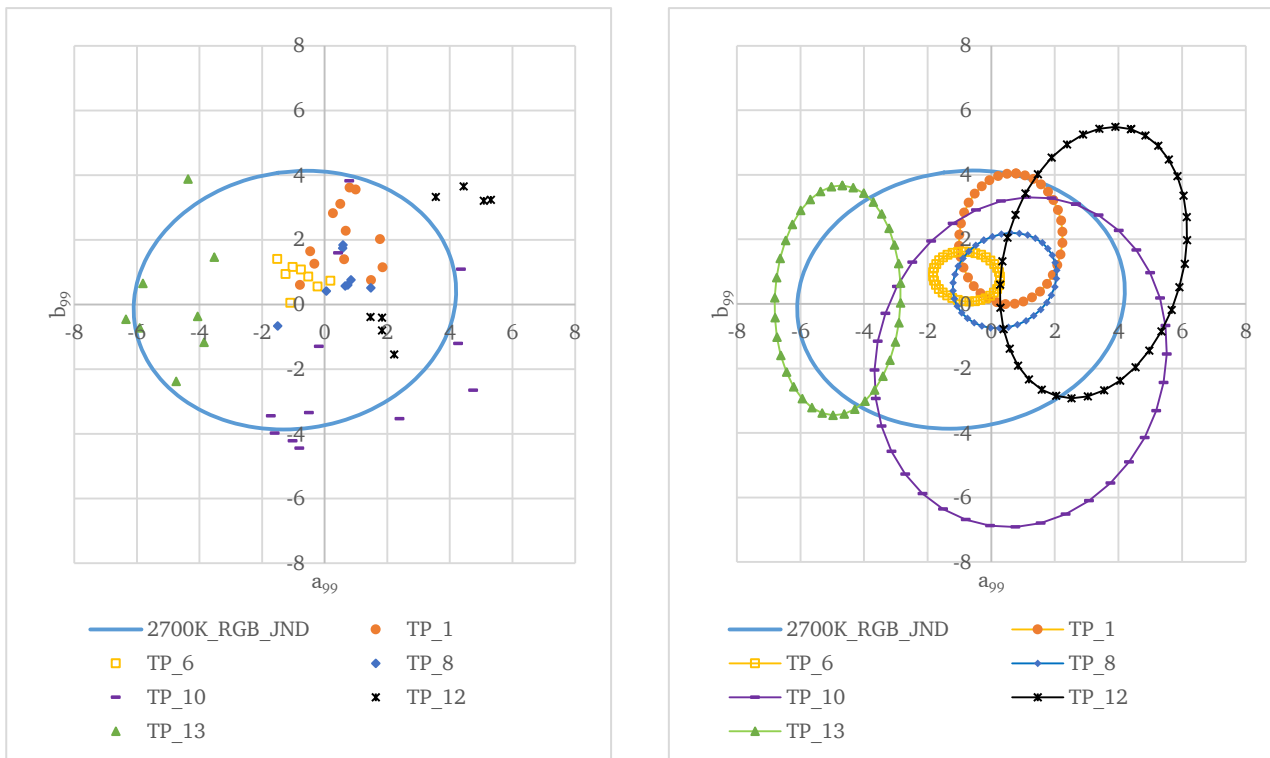


Abbildung 93: Individuelle Punktwolken (links) und Ellipsen (rechts) für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 2700 K-Referenz und 2700 K RGB-Einstellung. Jeder Testperson ist eine eigene Markierung zugeordnet.

Bei den 2700 K-RGB-Einstellungen sind für die Ergebnisse der Testpersonen 1, 6 und 8 starke Überschneidungen bei deren Ellipsen erkennbar. Des Weiteren sind deren Ellipsen in den gelblichen Bereich verschoben. Die Ellipse der Testperson 10 schließt die Ellipsen der Testpersonen 1, 6 und 8 ein, hat eine größere Streuung und ist ins Blaurötliche verschoben. Die Ellipse der Testperson 12 überschneidet sich mit den Ellipsen der Testpersonen 1, 6 und 10, da ihr Mittelpunkt in den rötlichen Bereich verschoben ist. Die Ellipse der Testperson 13 hat im Vergleich kaum Überschneidungen mit denen der anderen Testpersonen und ist stark in den bläulichen Bereich verschoben.

Abbildung 94 zeigt für die 2700 K RGBW-Einstellung die einzelnen Punktwolken, sowie deren Ellipsen für den JND-Bereich.

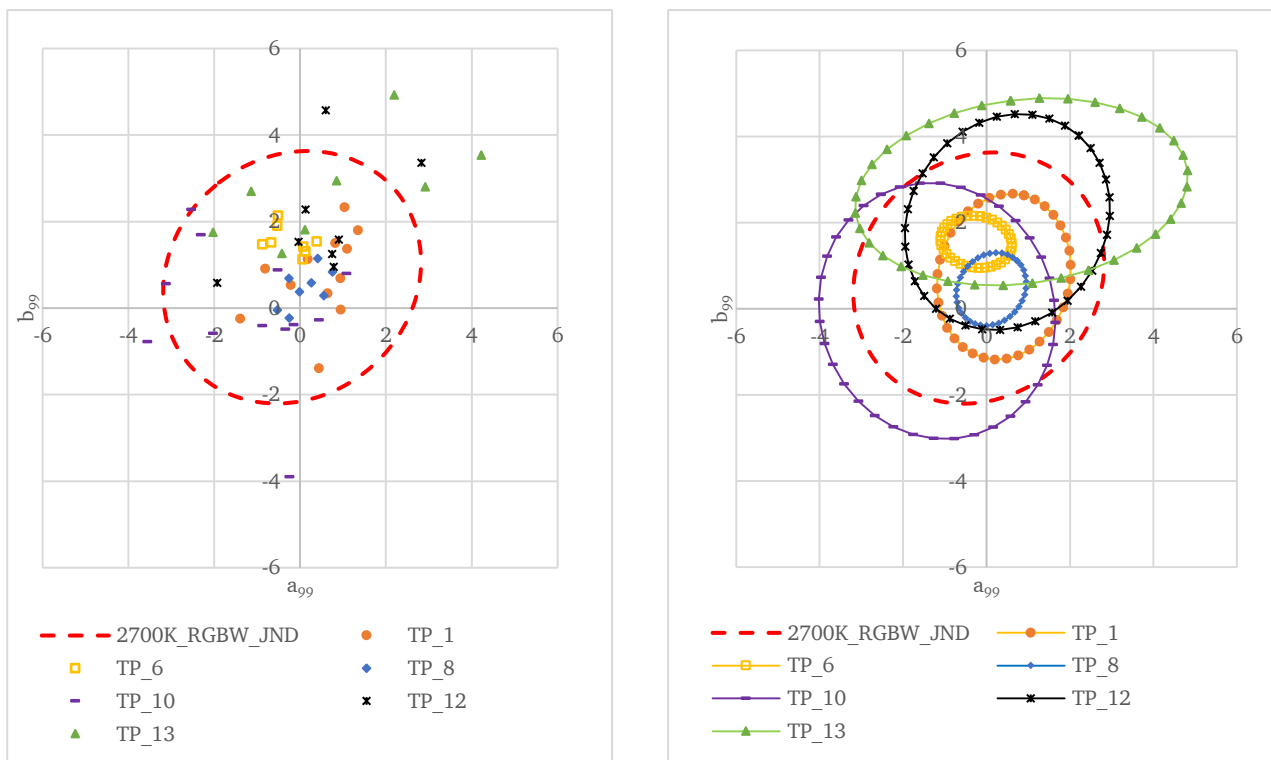


Abbildung 94: Individuelle Punktwolken (links) und Ellipsen (rechts) für die Sehbedingung „gerade wahrnehmbarer Unterschied“ für den Vergleich zwischen 2700 K Referenz und 2700 K RGBW-Einstellung. Jeder Testperson ist eine eigene Markierung zugeordnet.

Die intrapersonellen Streuungen sind auch für die 2700 K RGBW-Einstellung deutlich erkennbar. Im Gegensatz zu den RGB-Einstellungen liegen die Punkte und Ellipsen näher zusammen, so dass es zu stärkeren Überschneidungen kommt. Nur die Ellipse der Testperson 10 ist in den blau-grünen Bereich verschoben, während die Ellipsen sämtlicher anderer Testpersonen sich eher im gelblichen Bereich befinden.

### Betrachtung der Ergebnisse einer einzelnen Testperson

Die bisherigen Ergebnisse der intrapersonellen Streuung zeigen eine Abhängigkeit der Farbwahrnehmung von den zu vergleichenden Lichtspektren. Für beide Farbtemperaturen sind die Überschneidungen zwischen der jeweiligen Referenz und RGBW-Einstellung stärker als für die RGB Einstellung. An dieser Stelle kommt die Frage auf, wie diese Streuungen zu Stande kommen. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist sicherlich die Tagesform. Im Folgenden wird anhand einer ausgewählten Testperson untersucht, welcher Farbton in Abhängigkeit vom Lichtspektrum am stärksten streut. Es gilt dabei zu beachten, dass die Ergebnisse der ausgewählten Testperson nur bezüglich der Streuung repräsentativ sind, nicht hinsichtlich des Farbeindrucks.

Wie in Abschnitt 2.3.7 beschrieben, wird für den Test die 5200 K RGB-Einstellung zuerst visuell auf die Referenz abgeglichen. Anschließend wird der Farbeindruck so weit verändert, bis im Vergleich zu der Referenz ein „gerade wahrzunehmender Unterschied“ zu erkennen ist. Hierzu wird für jeden Testdurchlauf der Abstand zwischen dem visuellen Abgleich und den vier farblichen Änderungen berechnet.

$$\Delta E_{99} = \sqrt{(a_{99\_Match} - a_{99\_Rot,Grün,Gelb,Blau})^2 + (b_{99\_Match} - b_{99\_Rot,Grün,Gelb,Blau})^2} \quad (99)$$

Durch Einsetzen der Farbkoordinaten nach einem Abgleich und den vier Koordinaten der Sehbedingung JND in die Formel (53) ergibt sich Formel (99).

In Abbildung 95 sind die Farbtorte eingezeichnet, bei denen die Testperson 1 im Vergleich zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K-RGB Einstellung einen farblichen Unterschied wahrgenommen hat. Zusätzlich ist in die Abbildung die JND-Ellipse eingezeichnet, die auf der interpersonellen Streuung basiert. Abbildung 96 zeigt für die einzelnen Testdurchläufe die Abstände  $\Delta E_{99}$  zwischen dem Farbtort nach einem Abgleich und den JND-Farbtorten.

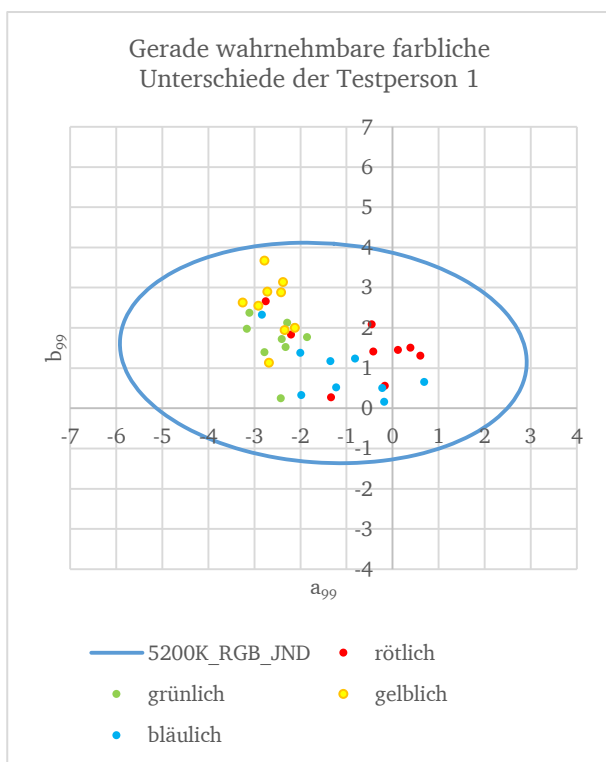


Abbildung 95: Farbtorte, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGB-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat.

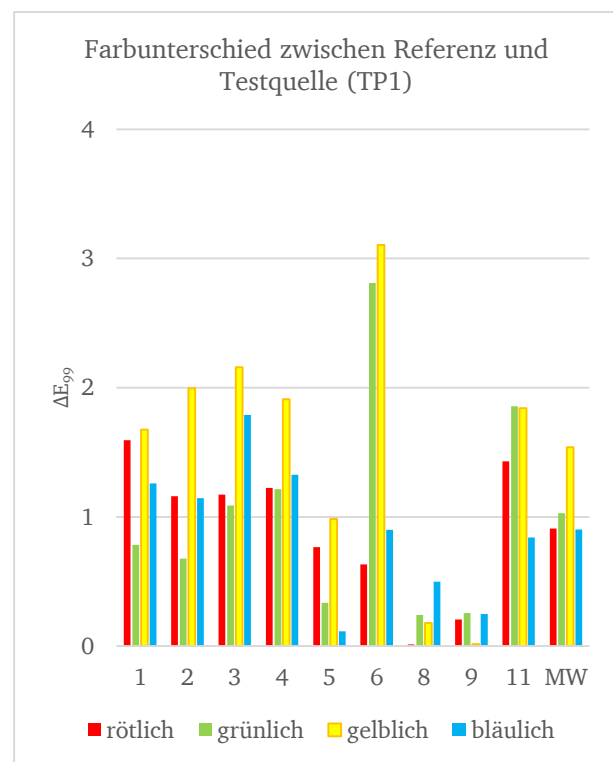


Abbildung 96: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den vier gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGB).

Aus den Abbildungen geht hervor, dass bereits die Beurteilung des Farbeindrucks starken Schwankungen unterliegt. Der Abstand zwischen den Koordinaten des Abgleiches und dem gerade wahrnehmbaren gelblichen Farbeindruck ist größer als für die anderen Farbtöne. Im Mittel beträgt der Abstand  $\Delta E_{99\_gelb}$  etwa 1,6. Die Abstände für die Farbeindrücke rot, grün und blau liegen etwa bei Werten zwischen 0,8 und 1. Auffällig sind die Testdurchläufe 8 und 9 (Abbildung 96), da bei diesen die Testperson 1 bereits geringfügige Farbtonänderungen wahrgenommen hat.



Abbildungen Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen die Farborte von Testperson 1 für die 5200 K RGBW-Einstellung, sowie die Abstände  $\Delta E_{99}$  der einzelnen Testdurchläufe für einen gerade wahrnehmbaren Unterschied.

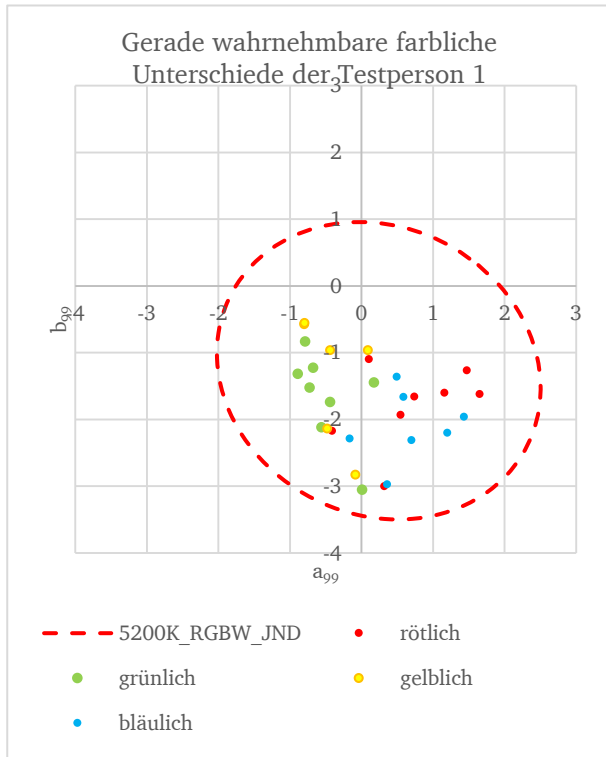


Abbildung 97: Farborte, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 5200 K-Referenz und der 5200 K RGBW-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat.

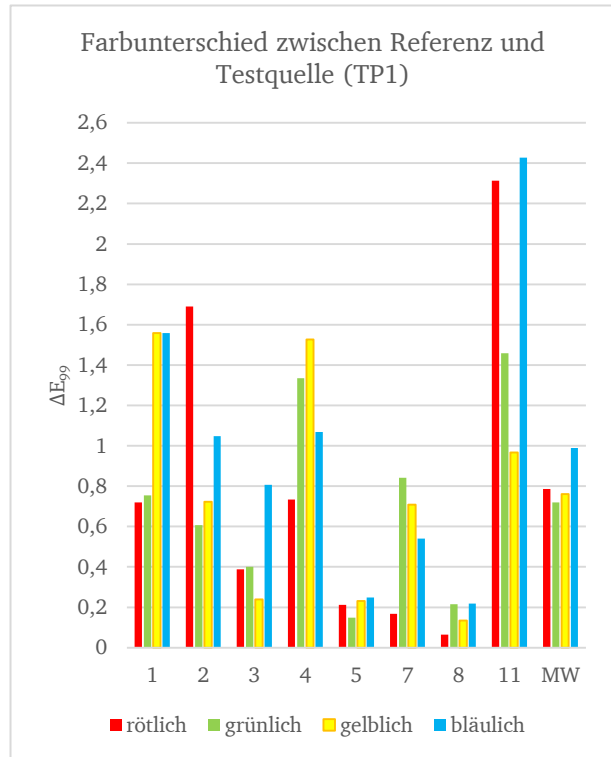


Abbildung 98: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den vier gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGBW).

Auch für diese Einstellung sind starke Schwankungen zwischen den Testdurchläufen zu erkennen. Im Vergleich zu den 5200 K RGB-Einstellungen sind die Abstände etwas geringer, wobei das auch in diesem Fall von der Tagesform abhängig zu sein scheint. Der Abstand zwischen den Koordinaten des Abgleiches und dem gerade wahrnehmbaren bläulichen Farbeindruck ist größer als für die anderen Farbtöne. Im Mittel beträgt der Abstand  $\Delta E_{99\_blau}$  etwa 1. Die Abstände für die Farbeindrücke rot, grün und gelb liegen unter 0,8. Bei den Testdurchläufen 5 und 8 hat die Testperson bereits geringfügige Farbtonänderungen wahrgenommen. Ansonsten sind keine allgemein gültigen Tendenzen zu erkennen.

Abbildungen Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen für die Farborte von Testperson 1 den JND der 2700 K RGB- Einstellung, sowie die einzelnen Testdurchläufe die Abstände  $\Delta E_{99}$  zwischen dem Farbort nach einem Abgleich und den JND-Farborten.

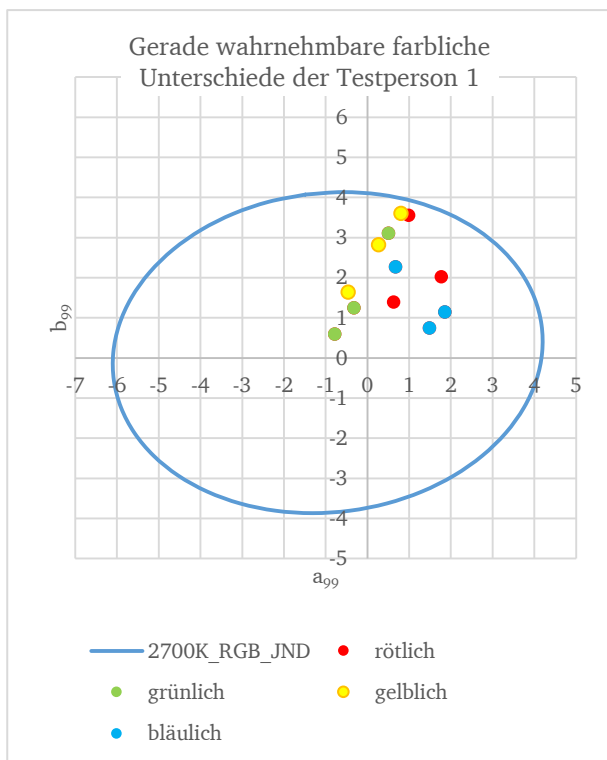


Abbildung 99: Farbtöne, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 2700 K-Referenz und der 2700 K RGB-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat.

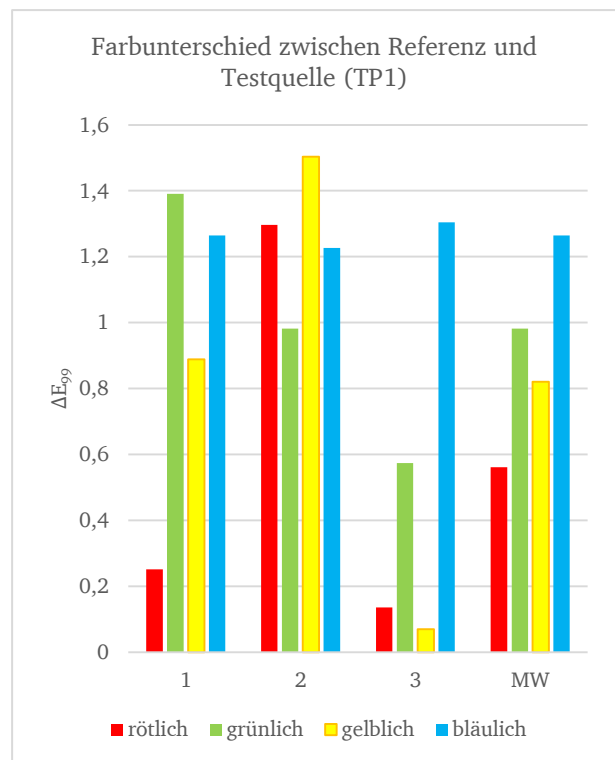


Abbildung 100: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den vier gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGB).

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Punkte in den rot-gelben Bereich verschoben sind. Der Abstand  $\Delta E_{99\_blau}$  ist über die drei Testdurchläufe konstant, während die anderen Farbtöne starken Schwankungen unterliegen. Der Abstand zwischen den Koordinaten des Abgleiches und dem gerade wahrnehmbaren bläulichen Farbeindruck ist größer als für die anderen Farbtöne. Im Mittel beträgt der Abstand  $\Delta E_{99\_blau}$  etwa 1,2. Die Abstände für die Farbeindrücke rot, grün und gelb liegen im Mittel zwischen etwa 0,6 und 1. Auffällig sind bei Testdurchlauf 3 die Abstände der roten, grünen und gelben Farbtöne, welche im Vergleich zum Blauton sehr viel geringer sind. Ansonsten sind keine allgemein gültigen Tendenzen zu erkennen.

Die Abbildungen Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen für die Farbtöne von Testperson 1 für den JND der 2700 K RGBW-Einstellung, sowie die einzelnen Testdurchläufe die Abstände  $\Delta E_{99}$  zwischen dem Farbort nach einem Abgleich und den JND-Farbtönen.

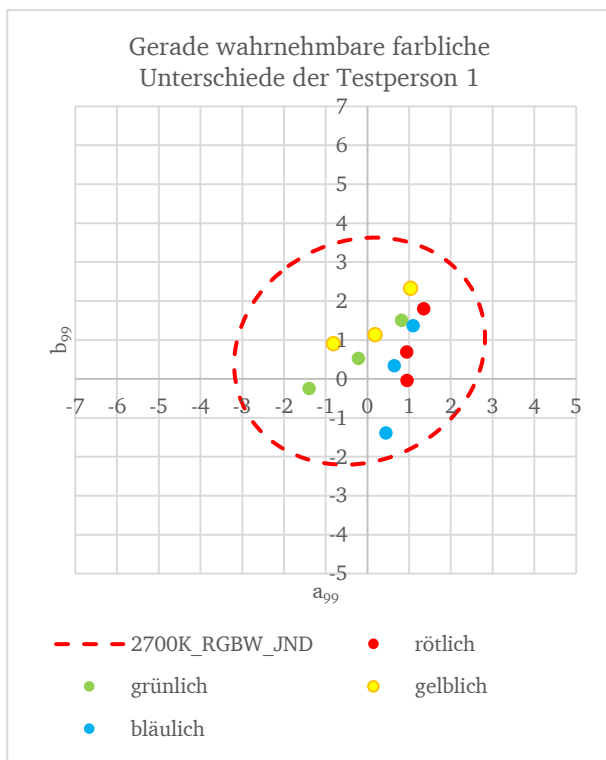


Abbildung 101: Farbtöne, an denen die Testperson 1 bei einem Vergleich zwischen der 2700 K-Referenz und der 2700 K RGBW-Einstellung einen rötlichen, grünlichen, gelblichen oder bläulichen Farbeindruck wahrgenommen hat.

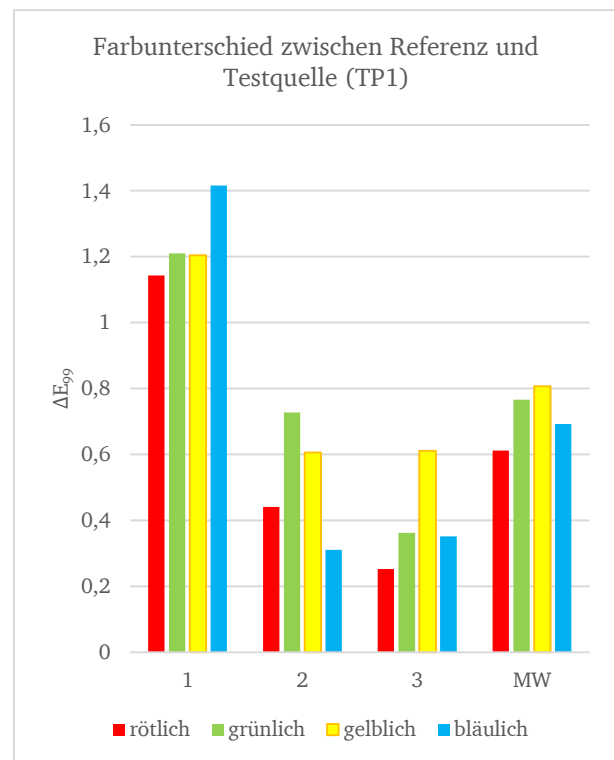


Abbildung 102: Abstände zwischen dem visuellen Abgleich und den vier gerade wahrgenommenen Farbeindrücken für die einzelnen Testdurchläufe der Testperson 1 (RGBW).

Wie bei den vorigen Einstellungen sind die Punkte hier wieder in den rot- gelben Bereich verschoben. Der Abstand zwischen den Koordinaten des Abgleiches und dem gerade wahrnehmbaren gelblichen Farbeindruck ist geringfügig größer als für die anderen Farbtöne. Im Mittel beträgt der Abstand  $\Delta E_{99\_gelb}$  etwa 0,8. Die Abstände für die Farbeindrücke rot, grün und gelb liegen im Mittel zwischen etwa 0,6 und 0,8. Auffällig sind bei Testdurchlauf 1 die Abstände der Farbtöne, welche im Vergleich zu den anderen beiden Testdurchläufen fast doppelt so groß sind. Ansonsten sind keine allgemein gültigen Tendenzen zu erkennen.

---

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Problematik, dass Lichtquellen mit unterschiedlichem Spektrum, aber gleichem Farbort von einem Beobachter als unterschiedlich wahrgenommen werden. Im Umkehrschluss sind visuell gleich aussehende Lichtquellen messtechnisch unterschiedlich. Eine mögliche Ursache für diesen Unterschied ist die bisherige Berechnung der Farborte, welche auf den Spektralwertfunktionen basieren.

Für diese Arbeit werden von einer Reihe von Testpersonen unterschiedliche Lichtquellen mit vergleichbarer Farbtemperatur und Farbort visuell aufeinander abgeglichen. Hierfür werden die Farbtemperaturen 5200 K und 2700 K untersucht. Für jede Farbtemperatur finden drei verschiedene Lichtspektren Verwendung, wobei eines der Spektren als Referenz dient, mit dem die beiden anderen jeweils verglichen werden.

Ausgehend von den in den Normen vorgeschriebenen Berechnungsmethoden werden die Farbabstände zwischen unterschiedlichen Lichtquellen in Abhängigkeit des Spektrums miteinander verglichen. Außerdem werden die Spektralwertfunktionen modifiziert bzw. es werden alternative Funktionen verwendet, um den Farbabstand zu minimieren. Da der Versuch von mehreren Testpersonen durchgeführt wird, ist ein weiterer Aspekt die Untersuchung der Streuung, die sich nach einem Abgleich der zu vergleichenden Lichtspektren einstellt. Über die Streuung kann ein Bereich definiert werden, in dem eine Gruppe von Testpersonen denselben visuellen Unterschied wahrnimmt. Dabei wird bei der Beschreibung des Bereiches eines möglichen Abgleiches zwischen der interpersonellen und der intrapersonellen Streuung unterschieden.

---

### 5.1 Beeinflussung des Abstandes

---

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen die Abhängigkeit des Abgleiches vom spektralen Verlauf der Lichtquelle. Durch die Wahl einer geeigneten Spektralwertfunktion kann der Farbabstand zwischen zwei Lichtquellen verringert werden, wobei die Auswahl einer geeigneten Bewertungsfunktion von den zu vergleichenden Spektren abhängig ist.

#### 5.1.1 Bewertung konventioneller Normspektralwertfunktionen

In den CIE Normen sind einige Spektralwertfunktionen zur Berechnung der Farborte vorgegeben. Es wird dabei zwischen Spektralwertfunktionen für ein  $2^\circ$  und ein  $10^\circ$  Gesichtsfeld unterschieden. Für den in dieser Arbeit verwendeten Aufbau wurde davon ausgegangen, dass die Verwendung der  $10^\circ$  Spektralwertfunktionen aufgrund des größeren Seh winkels auch in größeren Farbabständen resultieren.

Die Versuche haben gezeigt, dass unabhängig von der verwendeten Normspektralwertfunktion der Abstand zwischen der Referenz und der RGB-Einstellung größer ist als zwischen der Referenz und der RGBW-Einstellung. Für die RGB 5200 K-Einstellungen ist der mittlere Abstand

$\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$ , unabhängig von der verwendeten Normspektralwertfunktion, mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % größer als der Abstand  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ . Für die 2700 K-Einstellungen ist der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  für alle Normspektralwertfunktionen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % größer als der Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

Unter Verwendung der 10° Spektralwertfunktionen ergeben sich kleinere Abstände als für die 2° Funktionen, was damit zu erklären ist, dass die Probanden unter einem Winkel von mehr als 10 Grad auf die Probe geschaut haben.

Bei der Anwendung der Normspektralwertfunktion von 1964 sind die Abstände der RGB 5200 K-Einstellungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % am geringsten. Für den Abstand  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  können sowohl die Normspektralwertfunktion von 1964 als auch die Funktion von Stockmann 10° den geringsten Abstand berechnen. Bei den RGBW-Einstellungen berechnen die vier Spektralwertfunktionen für beide Farbtemperaturen vergleichbare Abstände, wobei aber die Funktion CIE1931 im Mittel einen etwas größeren Abstand  $\Delta\bar{E}^{RGBW}$  ergibt.

Der Vergleich der beiden Farbtemperaturen zeigt, dass sowohl für die RGB- als auch RGBW-Einstellungen die Abstände für die 2700 K-Einstellungen größer sind als für die 5200 K-Einstellungen.

### 5.1.2 Bewertung alternativer Spektralwertfunktionen

Die in den CIE Normen angegebenen Funktionen basieren auf den Empfindlichkeitsfunktionen individueller Beobachter [41]. Die Verwendung dieser individuellen Funktionen anstelle der Normspektralwertfunktionen kann zu einer Verringerung des Abstands führen. Allerdings sind die Abstände abhängig von Lichtspektrum. Die resultierenden Abstände der individuellen Funktionen werden außerdem zur Auswertung mit den Abständen der CIE1964 Normspektralwertfunktion verglichen.

Die daraus folgenden Ergebnisse zeigen für die 5200 K-Einstellungen, dass bestimmte individuelle Spektralwertfunktionen im Vergleich zu der Normspektralwertfunktion mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % den mittleren Abstand für beide Farbtemperaturen und beide RGB- bzw. RGBW-Einstellungen verkleinern können. Ein Vergleich der beiden Farbtemperaturen zeigt, dass mit einer 97,5 % Wahrscheinlichkeit die Abstände  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  kleiner oder gleich sind wie die Abstände  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$  und  $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ .

### 5.1.3 Verwendung einer modifizierten Normspektralwertfunktion

Eine alternative Möglichkeit zur Verringerung des Farbabstandes zwischen den Farborten ist die Modifikation einer vorhandenen Funktion. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - und  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven der CIE1964 Normspektralwertfunktion in 1 nm-Schritten entlang der Wellenlänge verschoben. Die Modifikation der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - und  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven beeinflusst die verschiedenen RGB- und RGBW-Einstellungen unterschiedlich stark. Generell ist der Abstand  $\Delta\bar{E}^{RGB}$  zwischen der Referenz und der RGB-Einstellung mit einer Wahrschein-

---

lichkeit von 95 % größer als der Abstand  $\Delta \bar{E}^{\text{RGBW}}$ . Eine Ausnahme bildet der Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGBW}}$ , der durch eine Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve zu längeren Wellenlängen größer wird als der Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGB}}$ .

Die  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurve lässt die Abstände der 5200 K-Einstellungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % ansteigen, je weiter sich die Kurve von ihrer ursprünglichen Position entfernt. Bei den 2700 K-Einstellungen wird nur der mittlere Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGB}}$  durch die Verschiebung der Kurve beeinflusst. Die Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurve hat dagegen keinen erkennbaren Einfluss auf die verschiedenen Abstände. Die  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurve beeinflusst die Abstände der RGB-Einstellungen beider Farbtemperaturen insgesamt stärker als die Abstände der RGBW-Einstellungen. Dabei lassen Verschiebungen zu den längeren Wellenlängen die Abstände ansteigen, während bei einer Verschiebung zu den kürzeren Wellenlängen die Abstände zunächst kleiner werden oder gleich bleiben, bevor sie steigen. Der Vergleich der beiden Farbtemperaturen ergibt keinen erkennbaren Unterschied zwischen den Abständen  $\Delta \bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGB}}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGB}}$  bzw.  $\Delta \bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$  und  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGBW}}$ .

#### 5.1.4 Individuelle Bewertung der Testpersonen

Bei der bisherigen Vorgehensweise wurde die individuelle Wahrnehmung der einzelnen Testpersonen vernachlässigt. Da die Farborte mit normierten Spektralwertfunktionen bewertet sind, kommt es zwischen den Beobachtern zu großen Unterschieden bei der Berechnung der Abstände. In Rahmen dieser Arbeit wurden den einzelnen Testpersonen eine oder mehrere Spektralwertfunktionen zugeordnet, die für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Abstand ergeben. Die zugewiesenen Spektralwertfunktionen beschränken sich dabei auf die individuellen Funktionen von Stiles und Burch und die Varianten der Normspektralwertfunktion CIE1964.

Es hat sich herausgestellt, dass die Anzahl an Spektralwertfunktionen, die einer Testperson zugeordnet werden kann, abhängig von der Lichtquelle ist. Die Testpersonen, denen für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$  eine größere Anzahl an Funktionen zugewiesen wird, haben für den Abstand  $\Delta \bar{E}_{2700\text{K}}^{\text{RGB}}$  nur noch drei bis vier Funktionen. Dabei hat der spektrale Verlauf einen großen Einfluss auf die Anzahl der Funktionen. Für die RGBW-Mischspektren können den Testpersonen zwei bis dreimal so viele Funktionen zugewiesen werden wie für die RGB-Mischungen. Generell haben die Testpersonen ihre eigenen Spektralwertfunktionen. Dennoch lassen sich für einige Einstellungen Gruppierungen an Testpersonen finden, welche für dieselben Funktionen den geringsten Abstand ergeben. Die Anzahl der möglichen Gruppierungen für die RGB-Einstellung ist generell geringer als für die RGBW-Einstellungen.

---

## 5.2 Alternativer Farbraum und alternative Methoden

---

### 5.2.1 Alternativer Farbraum

Die bisherigen Ansätze zur Berechnung der Farborte basieren auf den  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ - und  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurven. Die Zapfenempfindlichkeit wird allerdings durch die  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ - und  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird überprüft, ob die Verwendung eines Farbraumes, der auf den  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ - und  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven basiert, zu einer besseren Übereinstimmung zwischen dem instrumentellen und visuellen Abgleich führt. Die  $\bar{l}(\lambda)$ -,  $\bar{m}(\lambda)$ - und  $\bar{s}(\lambda)$ -Kurven werden hierzu entlang der Wellenlänge in 1 nm-Schritten verschoben und den Testpersonen individuell zugeordnet. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen der  $\bar{x}(\lambda)$ -,  $\bar{y}(\lambda)$ - und  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurven und den Funktionen von Stiles und Burch. Jeder Testperson können eine oder mehrere Funktionen zugewiesen werden und es lassen sich, abhängig von der Einstellung, unterschiedlich große Gruppierungen finden. Es wurde aber keine Funktion gefunden, die für alle Testpersonen einheitlich einen vergleichbar großen bzw. den geringsten Abstand ergeben hat.

### 5.2.2 Zuweisung einer Spektralwertfunktion in Abhängigkeit vom Lichtspektrum

Für die in dieser Arbeit untersuchten Lichtquellen werden bei einem instrumentellen Abgleich die Farbwerte unterschiedlicher Lichtquellen von verschiedenen Testpersonen farblich anders wahrgenommen. Die Verwendung alternativer Funktionen kann zu kleineren Farbabständen führen, allerdings bleibt immer noch ein Unterschied vorhanden.

Eine alternative Methode den Unterschied zwischen dem instrumentellen und visuellen Abgleich zu minimieren, ist die Bewertung unterschiedlicher Lichtquellen mit unterschiedlichen Spektralwertfunktionen. Dies könnte physiologisch plausibel sein, da die Einflüsse von unbekannten Netzhautsignalen, die in den jüngsten Forschungsarbeiten als Forschungsziel bereits erwähnt werden, auf solche, stark metamere Weißabgleiche im neuen, hier vorgestellten ingenieurwissenschaftlichen Blackbox-Ansatz berücksichtigt werden. Für diese Arbeit wurden die Amplituden der Spektralwertfunktionen der zu vergleichenden Lichtquelle verändert, bis deren Farborte mit denen der Referenzlichtquelle übereinstimmten. Die Änderung der Amplituden kann physiologisch wie folgt begründet werden. Ein unbekannter Netzhaut-Mechanismus, der den weißen Metamerie-Effekt hervorruft und sich durch konventionelle Größen (wie XYZ) nicht vollständig beschreiben lässt, bestimmt den Adaptationszustand (d.h. die Amplitudengröße) der Rezeptoren. Diese neue Berechnungsmethode wird auf jede Testperson einzeln angewendet. Es stellt sich heraus, dass die Amplitudenwerte der RGB- und RGBW-Einstellungen für die einzelnen Testpersonen vergleichbar groß sind. Intrapersonell kann keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, welche der beiden Einstellungen nach einem Abgleich zu höheren Amplitudenwerten führt. Man kann feststellen, dass die Amplituden der  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ -,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ - und  $\bar{s}_{10}(\lambda)$ -Kurven der RGB- und RGBW-Einstellungen größer sind als die der Referenzlichtquellen-Kurven. Dies deutet darauf hin, dass die Originalkurven die RGB-Einstellung zu schwach bewerten.

---

## 5.3 Bereiche erkennbarer Farbunterschiede

---

Die Testergebnisse verdeutlichen, dass die einzelnen Testpersonen in der Praxis unterschiedlichen Wahrnehmungen unterliegen. Die Streuung der Farborte nach einem visuellen Abgleich ist unter anderem abhängig von den zu vergleichenden Spektren. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, in welchen Bereichen die Testpersonen Farbunterschiede wahrnehmen können. Die Bewertung des Farbunterschiedes ist subjektiv und lässt sich in die Kategorien visuell abgeglichen, gerade wahrnehmbarer farblicher Unterschied, gerade tolerierbarer Unterschied und nicht mehr tolerierbarer Unterschied unterteilen. Es wird bei der Beschreibung des Bereiches zwischen der interpersonellen und der intrapersonellen Streuung unterschieden.

### 5.3.1 Interpersonelle Streuung

Für die interpersonelle Streuung sind die Ergebnisse der Testpersonen in Ellipsen zusammengefasst. Die Ellipsen definieren den Bereich, in dem für die teilnehmenden Testpersonen die jeweiligen Sehbedingungen erfüllt sind.

Generell zeigen die Ergebnisse bei beiden Farbtemperaturen eine größere Streuung für die RGB-Einstellung als für die RGBW-Einstellung. Des Weiteren hat sich bei der Betrachtung der interpersonellen Streuung herausgestellt, dass es zwischen den Bereichen der jeweiligen Sehaufgaben zu starken Überlappungen kommt.

Für die 5200 K RGB-Einstellung befinden sich viele der eingestellten Farborte, die von den Testpersonen als gerade tolerierbar bewertet wurden, im Bereich des gerade wahrnehmbaren Unterschiedes. Die interpersonellen Ellipsen sind somit keine Bestätigung für einen Bereich, in welchem die einzelnen Testpersonen einen ähnlichen Farbeindruck wahrgenommen haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass je größer die Streuung ist, desto größer auch der wahrgenommene Unterschied zwischen den Testpersonen ist.

### 5.3.2 Intrapersonelle Streuung

Um Bereiche festlegen zu können, in denen möglichst viele Testpersonen denselben Farbeindruck (d.h. Weißtoneindruck) wahrnehmen, muss die Streuung der eingestellten Ergebnisse für jede Testperson einzeln betrachtet werden. Die Schnittmenge der Streuung kann dann als ein möglicher Bereich betrachtet werden, in dem von den Testpersonen ein vergleichbarer farblicher Unterschied wahrgenommen wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Farborte der verschiedenen Testpersonen unterschiedlich stark streuen. Die Größe der Streuung scheint dabei unabhängig vom Lichtspektrum zu sein. Die Betrachtung der intrapersonellen Streuung ergibt eine stärkere Überlappung der individuellen Ellipsen bei der RGBW-Einstellung als bei der RGB-Einstellung.



---

## **5.4 Kritik und Anmerkungen**

---

### **5.4.1 Bewertung der Methodik**

Der verwendete Aufbau (Abschnitt 3.1) basiert auf dem indirekten Paarvergleich. Dabei werden die Lichtquellen nicht direkt, sondern indirekt über die Reflexion auf einer weißen Oberfläche beurteilt. Die Reflexionseigenschaften der beleuchteten Fläche beeinflussen das Spektrum, was die Vergleichbarkeit mit einigen anderen Arbeiten auf dem Gebiet des visuellen Abgleiches erschwert.

Ein weiteres Problem bei der verwendeten Methodik sind die RGB-Einstellungen. Die RGB-Einstellungen sind aus drei sehr schmalbandigen LED-Spektren zusammengesetzt. Daher sind nicht alle Farbeindrücke exakt einstellbar. Es ist allerdings anzumerken, dass die teilnehmenden Testpersonen die Farbunterschiede tendenziell gleich beurteilt haben. Auch wenn die interpersonelle Streuung der RGB-Einstellung größer ist als für die RGBW-Einstellung, so ist dies für die intrapersonelle Streuung nicht der Fall. Abhängig von der Testperson können Farborte der RGB- oder RGBW-Einstellung stärker streuen. Der Farbort der Referenzlichtquellen blieb im eingeschwungenen Zustand innerhalb eines Versuchsdurchlaufes konstant

### **5.4.2 Bewertung der Normspektralwertfunktionen**

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass der Unterschied des instrumentellen Abgleiches der Farborte von den verwendeten Spektralwertfunktionen abhängt. Jedem Lichtspektrum können dabei andere Spektralwertfunktionen zugewiesen werden, die den Farbabstand zu einer gegebenen Referenzlichtquelle minimieren. Die Übertragbarkeit der optimalen Spektralwertfunktionen dieser Arbeit auf andere Lichtquellen ist somit nicht gegeben.

Ein weiterer Kritikpunkt ist der verwendete Aufbau, welcher für ein 20° Gesichtsfeld (Abschnitt 3.1) ausgelegt ist. Gemäß den verwendeten CIE Normen [39] wird von einer Anwendbarkeit der Normspektralwertfunktionen für das 10° Gesichtsfeld ausgegangen. Möglicherweise ist das in den Normen beschriebene Verfahren zur Berechnung der Spektralwertfunktionen auf ein 20° Gesichtsfeld nicht ausreichend.

### **5.4.3 Bewertung der alternativen Berechnungsmethode**

Die alternative Berechnungsmethode zur Minimierung des Unterschiedes zwischen dem instrumentellen und visuellen Abgleich ist rein mathematisch und daher physiologisch nicht begründet. Sie basiert auf der Annahme, dass die Farbvalenz, den ein Lichtspektrum im menschlichen Auge auslöst, durch die konventionellen Berechnungsmethoden nicht genügend berücksichtigt wird. Das ist der ingenieurwissenschaftliche (Black-Box)-Ansatz dieser Arbeit. Jüngste Forschungsprojekte untersuchen zurzeit intensiv (bundesweit und international) den möglichen physiologischen Grund dieses weißen Metamerie-Effektes. (siehe Abschnitte 1.1 und 1.2 sowie [7][32][33][36][54])

---

Das Problem der vorgestellten Methode ist die inter- und intrapersonelle Streuung zwischen den Testpersonen. Die Veränderung der Amplituden hat zwar den Farbabstand minimiert, allerdings ist diese auch für die Lichtspektren und Testpersonen unterschiedlich. Es gibt keine Varianten, die für alle Lichtspektren und Testpersonen vergleichbar große Farbabstände ergibt.

#### **5.4.4 Inter- und Intrapersonelle Streuung**

An den Versuchen haben für jede Farbtemperatur elf Testpersonen teilgenommen. Jede Testperson hat die Versuche für die 5200 K-Einstellungen mindestens vier- bis sechsmal wiederholt, für die 2700 K Einstellungen ein- bis dreimal (siehe auch Abschnitt 3.2). Obwohl Tendenzen für die verschiedenen Abgleiche zu erkennen sind, ist die Anzahl der Testpersonen zu gering, um eine sichere Zuweisung der Spektralwertfunktionen zu den jeweiligen Lichtspektren machen zu können. Problematisch für diese Arbeit sind vor allem die 2700 K-Einstellungen, da hier die geringe Anzahl der Wiederholungen pro Testperson in einer relativ großen intrapersonellen Streuung resultiert. Ein weiterer Kritikpunkt dieser Arbeit ist die fehlende Verifizierung der festgelegten Bereiche, in denen ein Farbunterschied zu erkennen ist. Es wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Versuche durchgeführt, die bestätigen, dass eine Gruppe von Testpersonen in den Bereichen für JND, JTD und NTD, einen entsprechenden Farbunterschied wahrgenommen hat.

---

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasste sich mit der Vergleichbarkeit von Lichtquellen, die sich in ihrem spektralen Verlauf fundamental voneinander unterscheiden. Zum einen wurde bewertet in wie weit die Auswahl einer geeigneten Spektralwertfunktion den Farbabstand zwischen zwei zu vergleichenden Lichtquellen beeinflusst, zum anderen war von Interesse wie empfindlich verschiedenen Testpersonen gegenüber Farbveränderungen sind. Die Ergebnisse können dazu beitragen die Messgenauigkeit bzw. die Berechnungsmethode zur Bestimmung von Lichtquellen zu verbessern.

### **Vorhersagbarkeit der Farbwahrnehmung von Beleuchtungsspektren verschiedener Spektralwertfunktionen**

Grundlage zur Beschreibung des farblichen Eindrucks einer Lichtquelle bilden die CIE Normspektralwertfunktionen. Dabei unterscheidet man zwischen den Funktionen für ein  $2^\circ$  Gesichtsfeld und für ein  $10^\circ$  Gesichtsfeld. Bei der Entstehung dieser Funktionen ging man davon aus, dass der spektrale Verlauf einer Lichtquelle bei der Berechnung des Farbortes durch die Normspektralwertfunktionen ausreichend berücksichtigt wird. Vorangegangene Untersuchungen haben nachgewiesen, dass nach einem instrumentellen Abgleich von unterschiedlichen Lichtquellen Probanden einen Farbunterschied wahrnehmen können, bzw. dass visuell aufeinander abgegliche Lichtquellen in den späteren Berechnungen in einer Farbdifferenz  $\Delta E$  resultieren (siehe auch Abschnitt 1.1). Es gab bereits zahlreiche Verbesserungsvorschläge, welche eine gute Alternative für die vorhandenen Normspektralwertfunktionen darstellten, das Problem aber nicht vollständig beseitigen konnten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Normspektralwertfunktionen mit den in der Literatur beschriebenen Spektralwertfunktionen sowie einigen modifizierten Funktionen verglichen. Im Anschluss wurde versucht den verschiedenen Kombinationen von zu vergleichenden Lichtquellen eine geeignete Spektralwertfunktion zuzuordnen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Minimierung des Farbabstandes zwischen unterschiedlichen Lichtquellen sehr stark von der Auswahl der Spektralwertfunktion und von den zu vergleichenden Lichtquellen abhängt. Spektralwertfunktionen, welche den Abstand für einen bestimmten Vergleich minimieren konnten, führten bei einem Wechsel der Lichtquelle zu einer Vergrößerung des Abstandes. Eine einzelne Spektralwertfunktion ist somit nicht ausreichend, um den Farbabstand  $\Delta E$  für eine beliebige Vergleichskombination zu berechnen. Einen Hinweis auf die Ursache für diese Unvereinbarkeit findet sich in der Analyse der Testpersonen. Aufgrund der unterschiedlichen Bewertung der jeweiligen Testpersonen kann keine generell gültige Funktion verwendet werden, um den Farbabstand für einen Direktabgleich zu minimieren oder zu garantieren, dass die verschiedenen Testpersonen eine Beleuchtungssituation gleich beurteilen. Allerdings hat sich ergeben, dass eine Unterteilung der Testpersonen in Un-

---

tergruppen sinnvoll ist, um zumindest sicherzustellen, dass innerhalb dieser Gruppe die Testpersonen denselben Farbeindruck gesehen haben.

Die Arbeit hat sich auf die Untersuchung von zwei Farbtemperaturen mit jeweils drei unterschiedlichen Lichtspektren konzentriert. Es waren dabei keine klaren Tendenzen erkennbar wie eine Spektralwertfunktion ausgewählt werden muss um die farbliche Wahrnehmbarkeit einer Beleuchtungsquelle vorherzusagen. Es sind weitere Tests auf diesem Bereich nötig um die Datenmenge zu erweitern. Mit einer ausreichend großen Menge an Vergleichsspektren lässt sich dann vielleicht ein Muster erkennen, welches die Spektralwertfunktionen für eine gegebene Kombination von zu vergleichenden Lichtquellen geeignet ist.

### **Untersuchung der inter- und intrapersonellen Streuung von visuell aufeinander abgeglichenen Lichtquellen unterschiedlicher spektraler Verläufe**

Ein Problem in der Farbwahrnehmung sind die interpersonellen Toleranzgrenzen bei der Bewertung von Farbunterschieden. Bei der Beurteilung einer Szenerie ist es schwierig den gesamten farblichen Kontext zu erfassen und zu bewerten, da Faktoren wie Alter und Tagesform die Farbwahrnehmung beeinflussen. Auch spielen genetische Abweichungen eine wesentliche Rolle. Für die praktische Anwendung ist es zwar unvorteilhaft den Farbtort für jede Testperson mit den individuellen Spektralwertfunktionen zu bestimmen. Allerdings ist dies sinnvoll Bereiche im Farbraum zu finden, in welchen die Testpersonen denselben Farbeindruck wahrnehmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden über einen visuellen Farbabgleich unterschiedlicher Lichtquellen die inter- und intrapersonellen Streuungen von Testpersonen in der Richtung bestimmt und verglichen. So konnten Bereiche im Farbraum identifiziert werden, in welchen die Personengruppen verschiedene Abstufungen von Farbunterschieden wahrgenommen haben. Dabei wurde zwischen den folgenden Farbeindrücken unterschieden.

- Gerade wahrnehmbarer Farbunterschied: Die Testperson meint, gerade einen Farbtonunterschied zwischen den weißen Flächen wahrzunehmen.
- Gerade tolerierbarer Farbunterschied: Die Testperson kann einen farblichen Unterschied erkennen, erkennt aber noch an, dass die Referenz- und Vergleichslichtquelle noch gerade akzeptabel ähnlich erscheinen.
- Gerade wahrnehmbarer Farbunterschied: Die Testperson meint gerade einen Farbtonunterschied zwischen den weißen Flächen wahrzunehmen.

Da die verschiedenen Personen eine unterschiedliche Wahrnehmung haben, wurden die Abgleiche der jeweiligen Personen einzeln betrachtet. Ziel war es durch die Überlagerung der gefundenen Bereiche einen gemeinsamen Nenner zu finden, welcher dann als der Bereich definiert werden kann, für welchen alle Testpersonen einen vergleichbaren Farbabgleich erzielt haben. Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Vorgehen bedingt möglich ist. Wie bei den Untersuchungen der Spektralwertfunktionen hat sich herausgestellt, dass eine Beurteilung und das Finden einer allgemeingültigen Funktion von dem betrachteten Lichtspektrum abhängen. Tendenziell hat sich Folgendes herausgestellt: je aufgefüllter das Lichtspektrum der Vergleichsquellen ist, desto mehr Übereinstimmung wird zwischen den Testpersonen erreicht. Wenn spektrale Anteile fehlen, (RGB Mischung) führte dies zu Abweichungen bei der Beurteilung.

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurden tendenziell Bereiche identifiziert, welche auf einen farblichen Abgleich für die teilnehmenden Testpersonen hinweisen. Weiterführende Untersuchungen sind nötig um zu überprüfen, ob die gefundenen Bereiche auf andere Testpersonen anwendbar sind.

---

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Völker, S.; Schumacher, H.: *“Forschungsbericht: UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting, Band 4, BMBF Forschungsprojekt“*, (Lauffzeit von 01.08.2010 bis 31.05.2014) Universität Berlin, Universitätsverlag Berlin (2015)
- [2] Dyble, M.; Narendran, N.; Bierman, A.; Klein, T.: *“Impact of Dimming White LED`s: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods”*, Paper, Veröffentlicht: Fifth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE (2005)
- [3] Habers, G.; McGroddy, K.; Petluri R.; Tseng, P.K.; Yriberri, J.: *“Visual Color Matching of LED and Tungsten-Halogen Light Sources”* Paper Xicato, CIE 2010
- [4] MacAdam, D.: *“Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight”*. In: Journal of the Optical Society of America 32 (1942), Nr.5, S.247 – 274
- [5] Brown, W.; MacAdam, D.: *“Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences”*, In: Journal of the optical Society of America 39 (1949), S.808-834
- [6] Brown, W.: *“Color Discrimination of Twelve Observers”*, In: Journal of the Optical Society of America 47 (1957), S137 – 143
- [7] Oicherman, B.; Luo, R.; Rigg, B.; Robertson, A.: *“Adaptation and Colour Matching of Display and Surface Colours”*, In: Color research and application 34 (2009), S. 182 – 193
- [8] Bühring H.: *“Eigenschaften des Farbenraumes nach DIN6176 (DIN99-Formel) und seine Bedeutung für die industrielle Anwendung”*, Paper Institute für Technische Elektronik RWTH Aachen (2002)
- [9] ISO 105-J03: *„Textiles-Tests for Color Fastness“*, 1<sup>st</sup> Ed., Geneva (1995)
- [10] CIE Publication No. 116, *“Industrial Color-Difference Evaluation”*, Vienna (1995)
- [11] IEC 61966-2-1: *“Multimedia systems and equipment – Colour measurement and management – Default RGB colour space - sRGB”*, Geneva (1999)
- [12] Luo, MR.; Cui, G.; Georgoula, M.: *“Colour difference evaluation for white light sources”*, Lighting Research and Technology (2014)
- [13] Hering, E.: *“Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn”*, Springer Verlag (1920)
- [14] Young, T.: *“On the Theory of Light and Colours”*. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 92 (1802), S.12-48
- [15] Helmholtz, J.C.: *“On the Theory of Compound Colours”*, In: Philosophical Magazine Series 44 (1852), S.519-534
- [16] Brainard, D.; Stockman, A.: *“Colorimetry”*, In Bass, M. (Hrsg.); DeCusatis, C. (Hrsg.); Enoch, J. (Hrsg.); Lakshminarayanan, V. (Hrsg.); Li, G. (Hrsg.); MacDonald, C. (Hrsg.); Mahajan, V.; Stryland, E. van (Hrsg.): *“The Optical Society of America Handbook of Optics”*, Bd. Volume III: Vision and Vision Optics. 3<sup>rd</sup> edition. MacGraw Hill, 2009

- 
- [17] Maxwell, J.C.: “*On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum*”, In: Proceedings of the Royal Society of London Bd.10, 1860, S. 404-409
- [18] Guild, J.: “*The Colorimetric Properties of the Spectrum*”, In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A 230 (1931), S.149-187
- [19] Wright, W.: “*A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*”, In: Transactions of the Optical Society 30 (1928-29), Nr.4, S.141-164
- [20] Judd, D.: “*A Comparison of Direct Colorimetry of Titanium Pigments with Their Indirect Colorimetry Based on Spectrophotometry and a Standard Observer*”, In: Journal of the Optical Society of America 39 (1949), Nr. 11, S.945-950
- [21] Stiles, W.: “*Interim Report to the Commission Internationale de`Eclairage*”, Zurich 1955, on the National Physical Laboratory`s investigation of colour-matching (1955). In: Optica Acta 2 (1955), S.168-181
- [22] Judd, D.: “*Committee W-1.3.1.-Colorimetry*”, In: Proceedings of the CIE Session Bruxelles (1959)
- [23] CIE1964: “*Offizielle Empfehlung, Komitee E-1.3.1.-Farbmessung*”, In: 15.Hauptversammlung in Wien, CIE Publication 11A, 1963, S.37
- [24] Wright, H.; Wyszecki, G.: “*Field Trial of 10° Color-Mixture Functions*“, In: Journal of the Optical Society of America 50 (1960), S.647-650
- [25] Stiles, W.; Wyszecki, G.: “*Field Trial of Color-Mixture Functions*”, In: Journal of the Optical Society of America 52 (1962), S.58-75
- [26] Thornton, W.: “*How Strong Metamerism Disturbs Color Spaces*”, In: Color research and application 23 (1998), S.402-407
- [27] Borbely, A.; Schanda, J.: “*Colour Matching Using LEDs as Primaries*”, In: COLOR research and application 29 (2004), S.360-364
- [28] TC-1-36: CIE 170-1:2006: “*Fundamental Chromaticity Diagram with Pysiological Axes – Part I Commission Internationale de`Eclairage*”, Forschungsbericht 2006
- [29] Stiles, W.; Burch, J.: “*N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958)*”, In: Optica Acta 6 (1959), S.1-26
- [30] Stockman, A.; Sharpe, L.; Fach, C.: “*The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches*”, In: Vision Research 39 (1999), S.2901-2927
- [31] Stockman, A.; Sharpe, L.: “*The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements is observers of known genotype*”, In: Vision Research 40 (2000), S.1711-1737
- [32] Bieske, K.; Csuti, P.; Schanda, J.: “*Colour Appearance of metameric lights and possible colorimetric description*“, In: CIE Expert Symposium on Visual Appearance, 2007
- [33] Sarkar, A.; Autrusseau, F.; Viénot, F.; LeCallet, P.; Blondé, L.: “*From CIE2006 physiological model to improved age-dependent and average colorimetric observers*”, In: Journal of the Optical Society of America A28 (2011), S.2033-2048
- [34] Crawford, B.: “*Colour Matching and Adaptation*”, In: Vision Research 5 (1965), S.71-78
-



- 
- [35] Wzszecki, G.; Fielder, G.: “*New Color-Matching Ellipses*”, In Journal of the Optical Society of America 61 (1971), S.1135-1152
- [36] Polster, S.: “Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit”,
- [37] Kramer, G; Schierz, C.: “*Color Discrimination Subject to Illuminant and Color Transition*”, Universität Ilmenau (2014)
- [38] Fairchild; Mark, D.: „*Color Appearance Models*”, *Second Edition*, Chichester: John Wiley and Sons, 2005. 0470012161
- [39] “*Colometry, Understanding the CIE System*”, CIE Colometry 1931 – 2006 CIE Prepring Edition 2006
- [40] Müller-Herbers, S.: „*Methoden zur Beurteilung von Varianten*“, Skript Planungsmethoden, Institut für Grundlagen der Planung, Universität Stuttgart
- [41] Stiles, W.; Burch, J.;N.P.L. „*Colour matching investigation: Final report (1958)*”, Optica Acta 6 (1959)
- [42] Söllner, S.; Khanh, T.Q.: „*Lichttechnik I - Skript zur Vorlesung*“, Fachgebiet Lichttechnik, TU-Darmstadt.
- [43] Khanh, T.Q.: Skript: „*Technische Optik*“. Fachgbiet Lichttechnik, TU-Darmstadt
- [44] Khanh, T.Q.: „*Physiologische und psychophysische Aspekte in der Photometrie, Colormetrie und in der Farbbildverarbeitung*“, Habilitationsschrift, Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau, Ilmenau (2004)
- [45] CIE 170-1-2006: “*Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes*”, CIE 170-1-2006.
- [46] Manninen, P.; Orreveteläen, P.: „*On spectral and thermal behaviors of AlGaInP light-emitting diodes under pulse-width modulation*”, *Appl. Phys. Lett.*, 2007.
- [47] Bieske, K.: “*Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht und Körperfarben.*” Tagung der LiTG 2007 Lüneburg. Technische Universität Ilmenau.
- [48] Wright; William, D.: „*A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*”. Transactions of the Optical Society 30 (1928) (4): 141–164.
- [49] Guild, J. (1932). „*The colorimetric properties of the spectrum*”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character 230: 149–187
- [50] DIN 6174, „*Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel*“. DIN 6174
- [51] DIN 6176, „*Farbmetrische Bestimmung von Farbständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel*“. DIN6176, März 2001
- [52] Bronstein, I.N.; e.al: “*Taschenbuch der Mathematik, Auflage:5.*”, Harri Verlag, 2004.
- [53] Bock, R.K.; Krischer, W.: „*The Data Analysis Brief Book*“. Springer ISBN-13: 978-3642083822
- [54] Csuti, P.; Schanda, J.: „*A Better Description of Metameric Experience of LED Clusters*”. CIE Meeting Budhapest: Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting, 2009
-



- 
- [55] Csuti, P.; Schanda, J. ; Petluri, R. ; McGroddy, K. ; Harbers, G.: „*Improved color matching functions for better visual matching of LED sources*”. CIE 27<sup>th</sup> Session – Sun City/ZA – Proceedings, 2011
- [56] CIE: *Technical Report, COLOMETRY*. CIE15:2004, 3<sup>th</sup> edition
- [57] Stockman, A.; Brainard, D.: „*Color vision mechanism*”. Bass, M. Bass, M. (Hrsg.); DeCusatis, C. (Hrsg.); Enoch, J. (Hrsg.); Lakshminarayanan, V. (Hrsg.); Li, G. (Hrsg.); Macdonald, C. (Hrsg.); Mahajan, V. (Hrsg.); Stryland, E. van (Hrsg.): *The Optical Society of America Handbook of Optics Bd. Volume III: Vision and Vision Optics*. 3rd edition. MacGraw Hill, 2009
- [58] Bodrogi, P.; Khanh, T. Q.: „*Semantic interpretation of the colour binning of white and coloured LEDs for automotive lighting products*”, ISAL 2013 [conference], Laboratory of Lighting Technology, Technische Universität Darmstadt
- [59] Hollwich, F.: „*Augenheilkunde in Klinik und Praxis s.l.*”, Georg Thieme Verlag, 1979
- [60] J. K. Bowmaker, H. J. A. Dartnall: „*Visual pigments of rods and cones in a human retina*”. In: *The Journal of Physiology*. Bd. 298, Januar 1980, ISSN 0022-3751, S. 501–511
- [61] Trezona, P. W.: „*Individual Observer Data for the Stiles-Burch 2° Pilot Investigation*”, In: NPL Report QU68, July 1984,
- [62] Stockman, A.; Sharpe, L. T. (2000): „*Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype*”. *Vision Research*, 40, S.1711-1737.
- [63] DIN 6169: „*Farbwiedergabe – Farbwiedergabe Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik*“. DIN 6169
- [64] DIN 5033 Teil 2: „*Farbmessung-Normvalenzsystem*“.
- [65] DIN 5033 Teil 3: „*Farbmessung-Farbmaßzahlen*“.
- [66] Cui, G.; Luo, M.R.; Rigg, B.; Roesler, G.; Witt, K.: „*Uniform Colour Spaces Based on the DIN99 Colour-Difference Formula*”, in *Color Research & Application* 27(4):282-290 August 2002
- [67] Luo M.R.; Cui, G.; Rigg, B.: „*The development of CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000*”. *Color Res Appl* 2001;26:340–350.
- [68] Kuehni G.: „*Towards an improved uniform color space*”. *Color Res Appl* 1999;24:253–265.
- [69] „*Spectro 320 Scanning Spektrometer*”, Gebrauchsanweisung Instrument Systems, Konica Minolta group.
- [70] Böll, M.; Bodrogi, P.; Khanh, T.Q.: „*Entwicklung eines energieeffizienten LED-Beleuchtungssystems – Strategien zur Lösung des Binning-Problems*”. DBU Abschlussbericht, 2012.
- [71] Khanh, T.Q.: „*Entwicklung, Herstellung und Praxistest einer Hochleistungs-LED Innenraumleuchte*“, Aktenzeichen 27246, DBU Abschlussbericht, 2011.
- [72] Ishihara S.: „*Tests for Colour Blindness*”. Handaya Hongo Harukich, Tokyo 1917
- [73] Lang, G.K.: „*Augenheilkunde*“, Thieme 2004, ISBM-10 3131028327.
- [74] Swanson, W.H. ; Cohen, J.M.: „*Color vision*”. In: *Ophthalmology Clinics of North America*. Bd. 16, Nr. 2, June 2003, ISSN 0896-1549, S. 179–203.
-

- 
- [75] Neitz, M.; Neitz, J.: "*Molecular Genetics of Color Vision and Color Vision Defects*". In: *Archives of Ophthalmology*. Bd. 118, Nr. 5, May 2000, ISSN 0093-0326.
- [76] "*Ishihara's Book for Colour Deficiency*", UNSPSC Code 42183001.
- [77] Narendran, N.; Deng, L. Freyssinier, J.P.; Yu, H.; Gu, Y.; Cyr, D.; Taylor, J.: "*Developing Color Tolerance Criteria for White LEDs*", Final Report January 2004, Light Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY 12180
- [78] ANSI C78.377-2011: "*American National Standard for Electric Lamps – Specifications for Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products*", NEMA, ID:100294
- [79] Polin, P.: „*Flimmereffekte von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung*“. Technische Universität Darmstadt [Dissertation], (2015) [Online-Edition: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4664>]
- [80] "*LED Color Stability - Solid State Lighting Technology Fact Sheet*". U.S. Department of Energy, [<http://apps1.eere.energy.gov/>]

# Anhang

## A. Hardware

Tabelle 22: Farbtemperatur, Farbwiedergabewert, Lichtstrom und Betriebsstrom der verwendeten Lichtquellen.

Bezeichnung	CCT /K	Ra	$\Phi$ /lm	I /mA
Müller Licht Halogen Kaltlichtreflektor 24180	2700	99,4	39,0	833
Osram DULUX L 18W/954 DE LUXE	5148	92,2	1087	78
Citizen CL-L251-HC6L1 350mA (ww)	3100	91,6	361	700
Citizen CL-L251-HC6N1 350mA (kw)	5200	96,9	382	700
Philips Lumileds LUXEON Rebel LXM2-PD01 (rot)	649	/	29	700
Philips Lumileds LUXEON Rebel LXML-PM01 (grün)	518	/	156	700
Philips Lumileds LUXEON Rebel LXML-PR01 (blau)	444	/	21	700

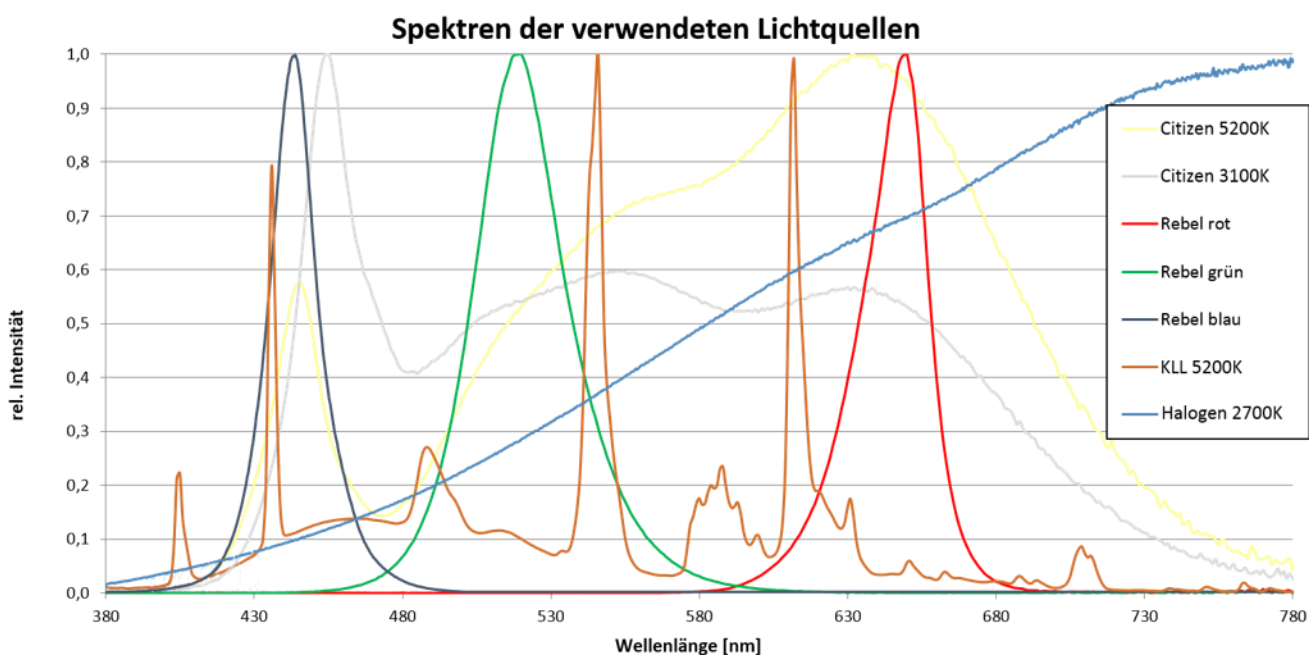


Abbildung 103: Lichtspektren der verwendeten Lichtquellen.

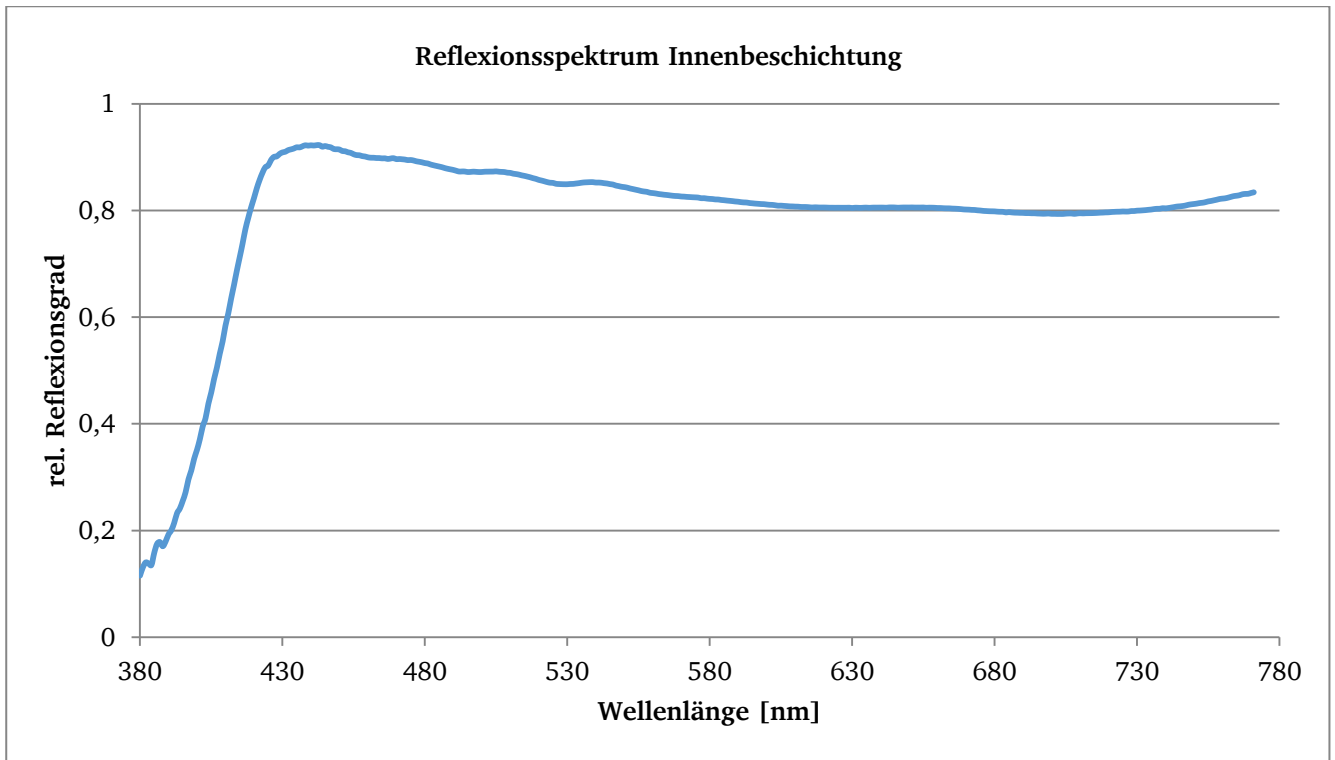


Abbildung 104: Reflexion der Innenbeschichtung, aufgetragen über die Wellenlänge.

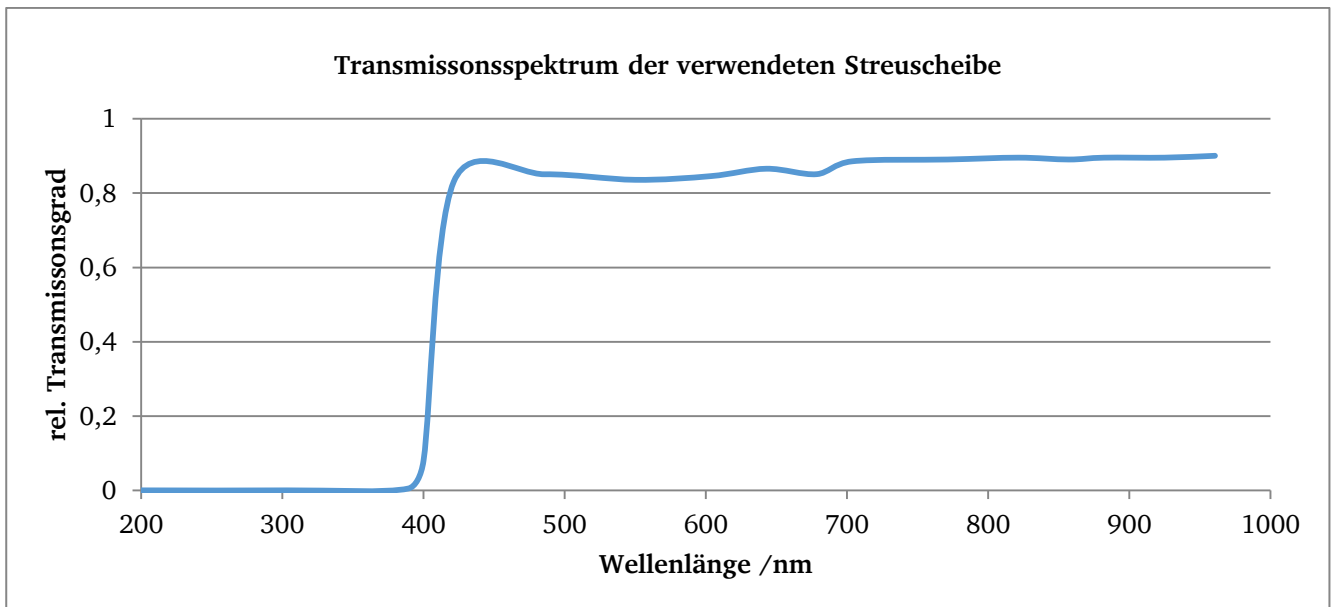


Abbildung 105: Transmission der diffuse Streuscheibe, aufgetragen über die Wellenlänge.

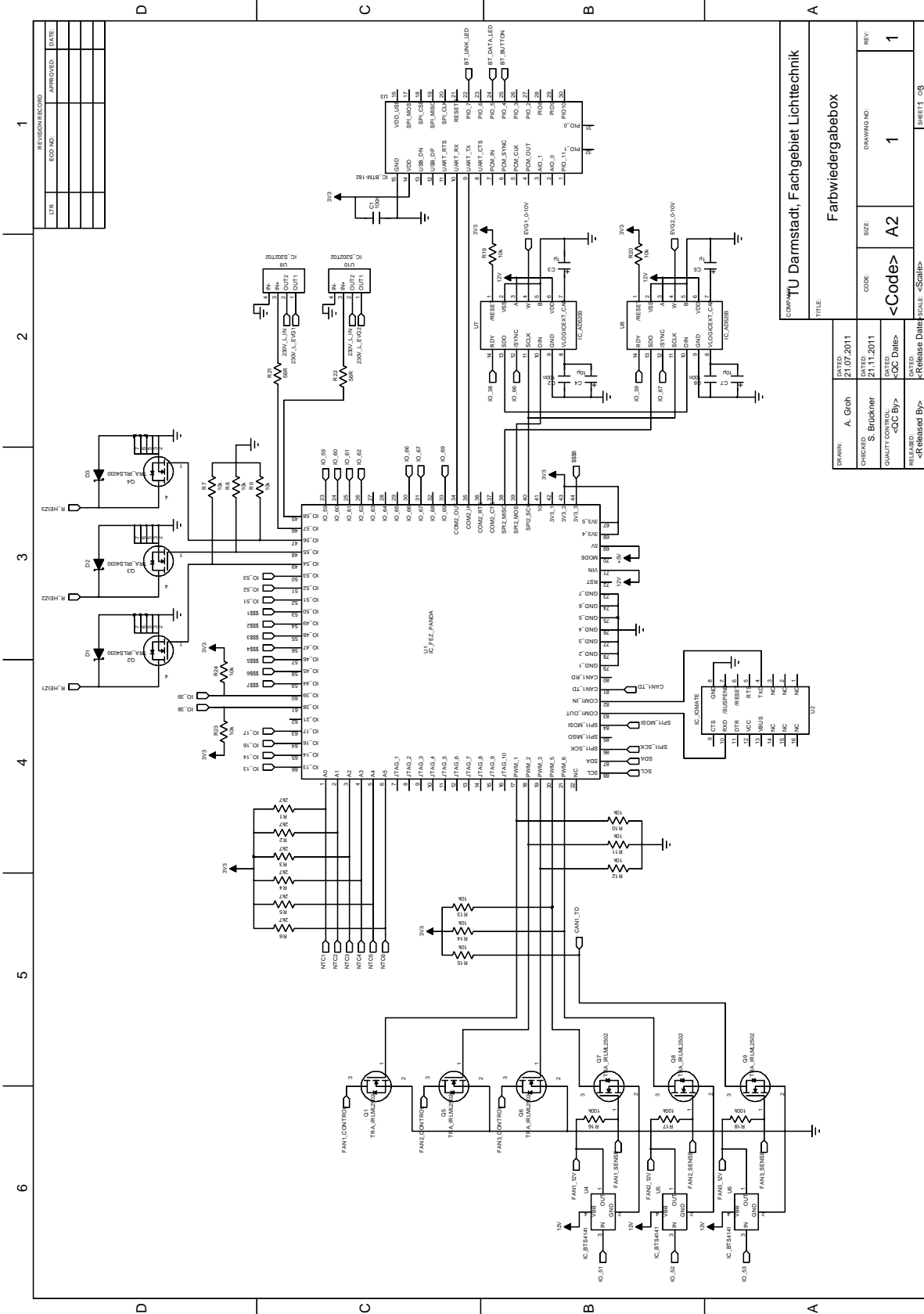


Abbildung 106: Schaltplan Hardware V1 (Seite 1 von 3)

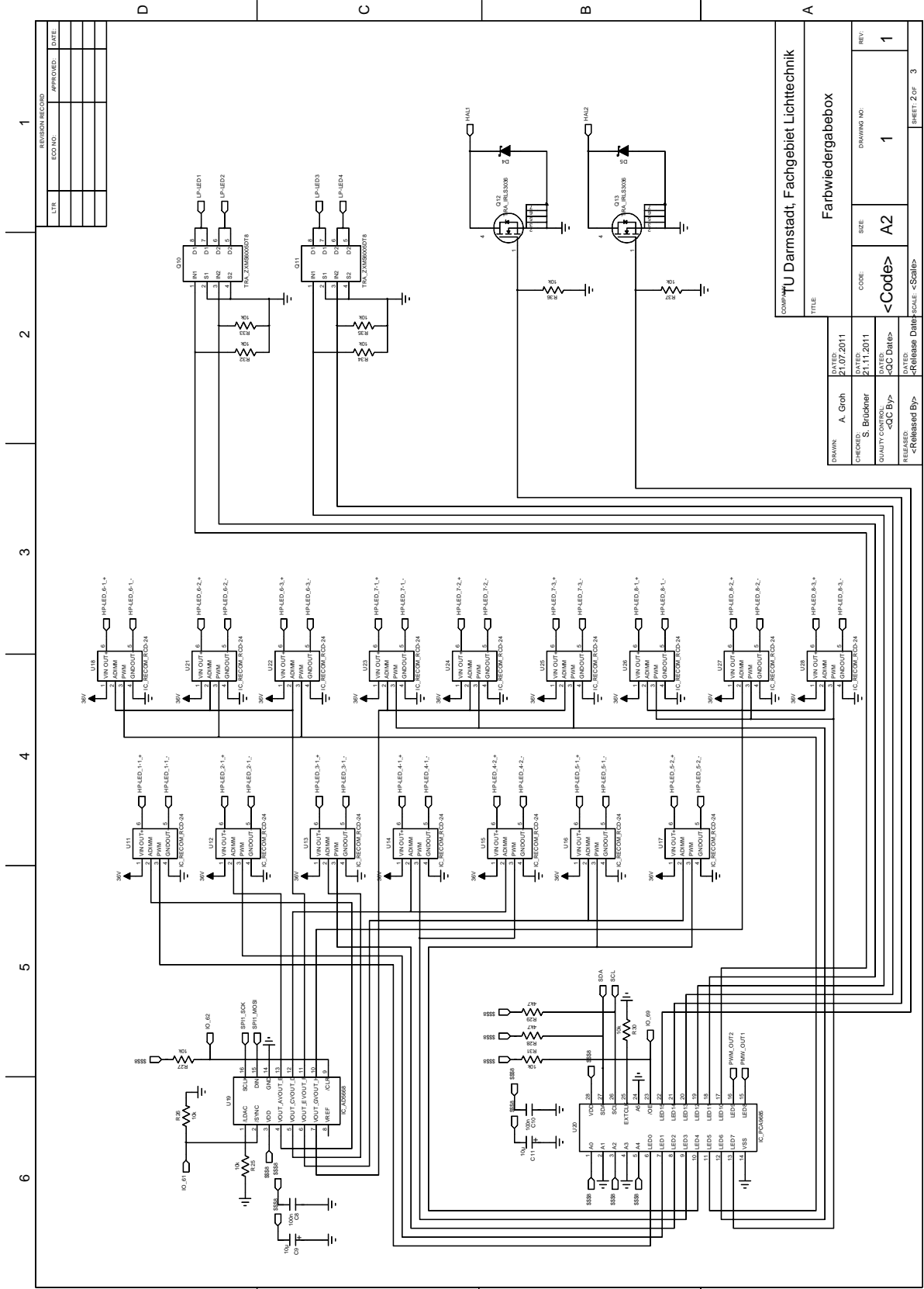


Abbildung 107: Schaltplan Hardware V1 (Seite 1 von 3)

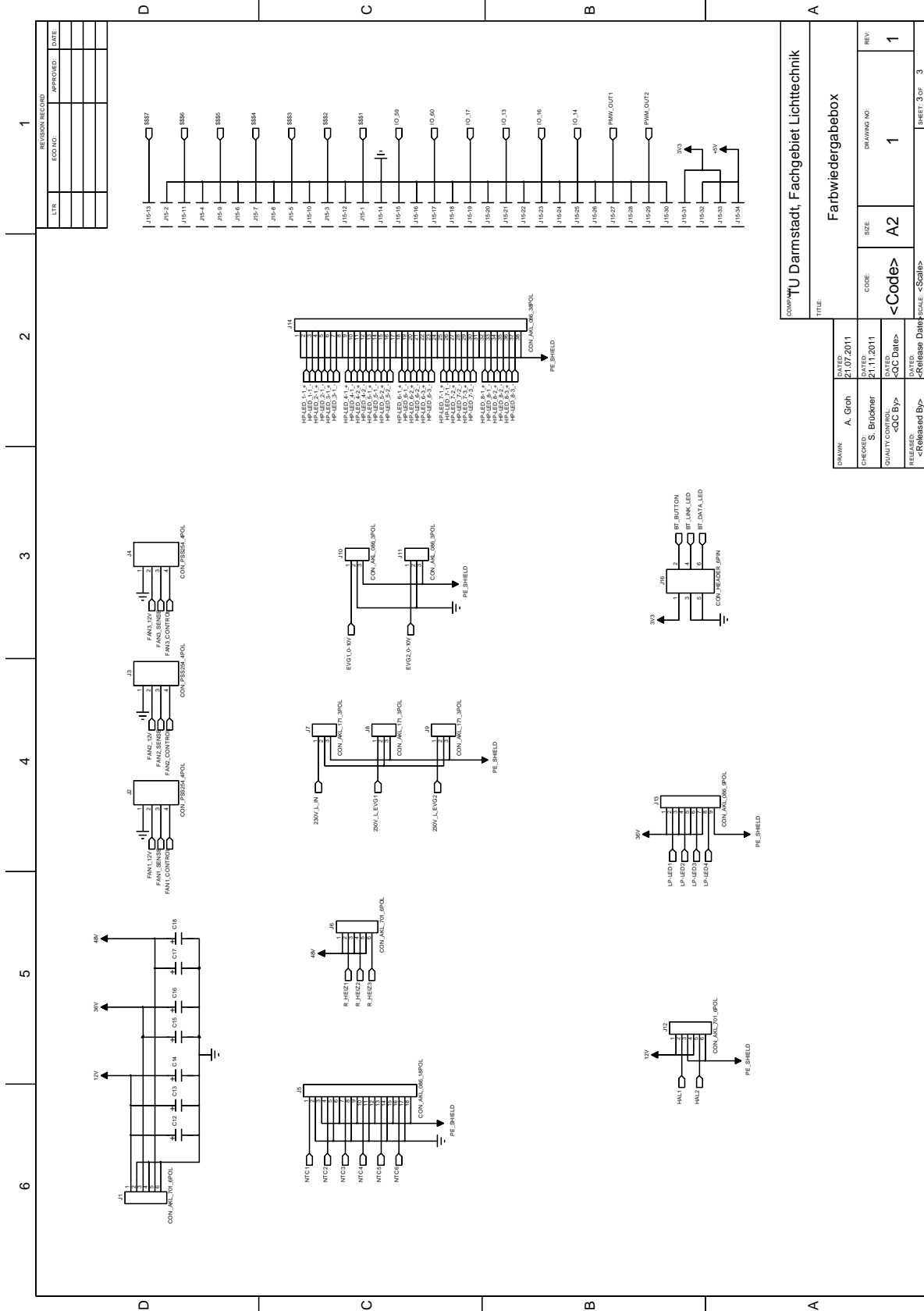


Abbildung 108: Schaltplan Hardware V1 (Seite 3 von 3)

## B. Statistik

Tabelle 23: t-Quantile, Vertrauensbereiche.

Anzahl der Freiheitsgrade n	P für zweiseitigen Vertrauensbereich							
	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,998
	P für einseitigen Vertrauensbereich							
	0,75	0,875	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999
1	1,000	2,414	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309
2	0,816	1,604	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	0,765	1,423	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	0,741	1,344	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	0,727	1,301	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	0,718	1,273	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	0,711	1,254	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785
8	0,706	1,240	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501
9	0,703	1,230	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297
10	0,700	1,221	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144
11	0,697	1,214	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025
12	0,695	1,209	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930
13	0,694	1,204	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852
14	0,692	1,200	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787
15	0,691	1,197	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733



## C. Mittelwerte und Konfidenzintervalle

### Ergänzung zu Kapitel 4.1

Tabelle 24: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 5200 K Referenz und der 5200 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$
CIE1964	2,8	[2,1 ; 3,4]	1,5	[1 ; 1,9]
Stockmann 10°	3,2	[2,6 ; 3,8]	1,4	[1,1 ; 1,8]
CIE1931	3,9	[2,5 ; 5,3]	2,1	[1,6 ; 2,7]
Stockmann 2°	4,3	[2,9 ; 5,7]	1,3	[0,9 ; 1,7]

Tabelle 25: Numerische Werte der über elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen der 2700 K Referenz und der 2700 K RGB bzw. der RGBW-Einstellung sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$
CIE1964	2,3	[1,2 ; 3,5]	1,5	[0,7 ; 2,3]
Stockmann 10°	2,7	[1,4 ; 3,9]	1,3	[0,6 ; 2,1]
CIE1931	6	[4,7 ; 7,4]	2,5	[1,8 ; 3,2]
Stockmann 2°	5,9	[4,6 ; 7,3]	1,8	[1 ; 2,6]

Tabelle 26: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

	$\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGB}$	$\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta\bar{E}_{5200K}^{RGBW}$
CIE1964	2,8	[2,1 ; 3,4]	1,5	[1 ; 1,9]
D.C. Marks	2,1	[1,3 ; 2,9]	1,4	[1 ; 1,8]
R.N. Wilson	2,3	[1 ; 3,6]	1,6	[1,2 ; 1,9]
E.M. Kinrade	2,3	[1,2 ; 3,4]	0,9	[0,5 ; 1,3]
W.D. Wright	2,4	[1,3 ; 3,5]	1	[0,6 ; 1,4]

Tabelle 27: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle.

	$\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGB}$	$\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta\bar{E}_{2700K}^{RGBW}$
CIE1964	2,3	[1,2 ; 3,5]	1,5	[0,7 ; 2,3]
D.C. Marks	2,4	[1 ; 3,7]	1,6	[0,8 ; 2,3]
R.N. Wilson	2,4	[1,3 ; 3,3]	1,4	[0,6 ; 2,1]
E.M. Kinrade	2,7	[1,7 ; 3,7 ]	1,4	[0,7 ; 2]
W.D. Wright	3,3	[2,1 ; 4,6]	1,3	[0,6 ; 1,9]

## Ergänzung zu Kapitel 4.1.4

Tabelle 28: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW- Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$
CIE1964	2,8	[2,1 ; 3,4]	1,5	[1 ; 1,9]
6 nm nach links	10,3	[9,5 ; 11,1]	3,5	[3,2 ; 3,8]
5 nm nach links	9,2	[8,3 ; 10,0]	3,0	[2,7 ; 3,3]
4 nm nach links	7,9	[7,0 ; 8,9]	2,5	[2,2 ; 2,9]
3 nm nach links	6,6	[5,6 ; 7,6]	2,1	[1,8 ; 2,4]
2 nm nach links	5,2	[4,1 ; 6,2]	1,7	[1,4 ; 2,0]
1 nm nach links	3,9	[3,1 ; 4,7]	1,5	[1,2 ; 1,7]
1 nm nach rechts	2,3	[1,3 ; 3,3]	1,9	[1,4 ; 2,3]
2 nm nach rechts	3,1	[1,7 ; 4,5]	2,4	[1,9 ; 2,9]
3 nm nach rechts	4,8	[3,4 ; 6,2]	3,1	[2,6 ; 3,6]
4 nm nach rechts	6,6	[5,2 ; 8,0]	3,8	[3,2 ; 4,3]
5 nm nach rechts	8,3	[7,0 ; 9,6]	4,5	[4,0 ; 5,1]
6 nm nach rechts	9,9	[8,7 ; 11,2]	5,3	[4,7 ; 5,8]

Tabelle 29: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$
CIE1964	2,8	[2,1 ; 3,4]	1,5	[1 ; 1,9]
6 nm nach links	3,5	[2,8 ; 4,2]	1,5	[1,1 ; 1,9]
5 nm nach links	3,4	[2,7 ; 4,0]	1,5	[1,1 ; 1,9]
4 nm nach links	3,3	[2,6 ; 3,9]	1,5	[1,1 ; 1,9]
3 nm nach links	3,1	[2,5 ; 3,8]	1,5	[1,1 ; 1,9]
2 nm nach links	3,0	[2,4 ; 3,6]	1,5	[1,1 ; 1,9]
1 nm nach links	2,9	[2,3 ; 3,5]	1,5	[1,1 ; 1,9]
1 nm nach rechts	2,7	[2,1 ; 3,3]	1,5	[1,1 ; 1,9]
2 nm nach rechts	2,7	[2,1 ; 3,3]	1,5	[1,1 ; 1,9]
3 nm nach rechts	2,6	[2,0 ; 3,2]	1,5	[1,1 ; 1,8]
4 nm nach rechts	2,6	[2,0 ; 3,2]	1,4	[1,1 ; 1,8]
5 nm nach rechts	2,6	[2,0 ; 3,2]	1,4	[1,0 ; 1,7]
6 nm nach rechts	2,6	[2,1 ; 3,2]	1,4	[1,0 ; 1,7]

Tabelle 30: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 5200 K Referenz und den 5200 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$
CIE1964	2,8	[2,1 ; 3,4]	1,5	[1 ; 1,9]
6 nm nach links	2,7	[2,1 ; 3,3]	2,0	[1,5 ; 2,5]
5 nm nach links	2,7	[2,1 ; 3,3]	1,6	[1,1 ; 2,1]
4 nm nach links	2,7	[2,1 ; 3,3]	1,4	[0,9 ; 1,8]
3 nm nach links	2,7	[2,1 ; 3,3]	1,2	[0,9 ; 1,6]
2 nm nach links	2,8	[2,1 ; 3,3]	1,2	[0,8 ; 1,6]
1 nm nach links	2,8	[2,2 ; 3,4]	1,3	[0,9 ; 1,7]
1 nm nach rechts	3,0	[2,2 ; 3,5]	1,8	[1,4 ; 2,2]
2 nm nach rechts	3,1	[2,3 ; 3,6]	2,0	[1,6 ; 2,5]
3 nm nach rechts	3,2	[2,4 ; 3,8]	2,3	[1,9 ; 2,8]
4 nm nach rechts	3,4	[2,5 ; 3,9]	2,6	[2,2 ; 3,0]
5 nm nach rechts	3,6	[2,7 ; 4,1]	2,9	[2,5 ; 3,3]
6 nm nach rechts	2,7	[3,0 ; 4,3]	3,2	[2,7 ; 3,6]

Tabelle 31: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$
CIE1964	2,3	[1,2 ; 3,5]	1,5	[0,7 ; 2,3]
6 nm nach links	11,1	[10,1 ; 12,0]	1,5	[0,7 ; 2,2]
5 nm nach links	9,7	[8,7 ; 10,8]	1,5	[0,7 ; 2,2]
4 nm nach links	8,3	[7,1 ; 9,4]	1,5	[0,7 ; 2,2]
3 nm nach links	6,7	[5,5 ; 8,0]	1,5	[0,7 ; 2,3]
2 nm nach links	5,1	[3,7 ; 6,4]	1,5	[0,7 ; 2,3]
1 nm nach links	3,5	[2,1 ; 4,8]	1,5	[0,8 ; 2,3]
1 nm nach rechts	2,6	[1,6 ; 3,7]	1,5	[0,8 ; 2,3]
2 nm nach rechts	3,8	[2,5 ; 5,2]	1,6	[0,8 ; 2,3]
3 nm nach rechts	5,4	[3,7 ; 7,0]	1,6	[0,8 ; 2,4]
4 nm nach rechts	7,0	[5,4 ; 8,6]	1,6	[0,8 ; 2,4]
5 nm nach rechts	8,6	[7,0 ; 10,2]	1,6	[0,8 ; 2,4]
6 nm nach rechts	10,1	[8,5 ; 11,6]	1,6	[0,8 ; 2,5]

Tabelle 32: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$
CIE1964	2,3	[1,2 ; 3,5]	1,5	[0,7 ; 2,3]
6 nm nach links	2,8	[1,4 ; 4,2]	1,6	[0,8 ; 2,3]
5 nm nach links	2,7	[1,3 ; 4,0]	1,6	[0,8 ; 2,3]
4 nm nach links	2,6	[1,3 ; 3,9]	1,6	[0,8 ; 2,3]
3 nm nach links	2,5	[1,3 ; 3,8]	1,5	[0,8 ; 2,3]
2 nm nach links	2,4	[1,2 ; 3,7]	1,5	[0,8 ; 2,3]
1 nm nach links	2,4	[1,2 ; 3,6]	1,5	[0,8 ; 2,3]
1 nm nach rechts	2,3	[1,2 ; 3,4]	1,5	[0,8 ; 2,3]
2 nm nach rechts	2,3	[1,1 ; 3,4]	1,5	[0,7 ; 2,3]
3 nm nach rechts	2,2	[1,1 ; 3,4]	1,5	[0,7 ; 2,3]
4 nm nach rechts	2,2	[1,1 ; 3,3]	1,5	[0,7 ; 2,3]
5 nm nach rechts	2,2	[1,1 ; 3,3]	1,5	[0,7 ; 2,2]
6 nm nach rechts	2,2	[1,2 ; 3,3]	1,5	[0,7 ; 2,2]

Tabelle 33: Numerische Werte der über die elf Testpersonen gemittelten Abstände zwischen den Farbkoordinaten der 2700 K Referenz und den 2700 K RGB- bzw. RGBW-Einstellungen sowie die dazugehörigen 95 % Konfidenzintervalle unter Verwendung der modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$	$\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$	Konfidenzintervall $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$
CIE1964	2,3	[1,2 ; 3,5]	1,5	[0,7 ; 2,3]
6 nm nach links	2,7	[1,3 ; 4,1]	1,8	[0,8 ; 2,7]
5 nm nach links	2,6	[1,2 ; 4,0]	1,6	[0,8 ; 2,5]
4 nm nach links	2,5	[1,1 ; 3,9]	1,5	[0,8 ; 2,3]
3 nm nach links	2,4	[1,1 ; 3,8]	1,4	[0,7 ; 2,1]
2 nm nach links	2,4	[1,1 ; 3,7]	1,4	[0,6 ; 2,1]
1 nm nach links	2,3	[1,1 ; 3,6]	1,4	[0,6 ; 2,2]
1 nm nach rechts	2,4	[1,3 ; 3,5]	1,8	[1,0 ; 2,5]
2 nm nach rechts	2,4	[1,4 ; 3,4]	2,1	[1,3 ; 2,8]
3 nm nach rechts	2,5	[1,6 ; 3,4]	2,4	[1,6 ; 3,2]
4 nm nach rechts	2,6	[1,7 ; 3,5]	2,8	[2,0 ; 3,6]
5 nm nach rechts	2,7	[1,9 ; 3,5]	3,2	[2,3 ; 4,0]
6 nm nach rechts	2,8	[2,0 ; 3,6]	3,6	[2,7 ; 4,4]



## D. Prüfwerte der Nullhypothesen

### Nullhypothese 1: $H_0: \mu^{\text{RGB}} > \mu_0^{\text{RGB}}$

Tabelle 34: Für die Verschiebung der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothese  $\mu_{5200\text{K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$  für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\mu_{5200\text{K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_5200\text{K}}^{\text{RGBW}}$
CIE1964 10°	4,7
6 nm nach links	18,6
5 nm nach links	15,5
4 nm nach links	12,5
3 nm nach links	9,8
2 nm nach links	7,5
1 nm nach links	6,7
1 nm nach rechts	1,0
2 nm nach rechts	1,0
3 nm nach rechts	2,7
4 nm nach rechts	4,6
5 nm nach rechts	6,4
6 nm nach rechts	8,2

Tabelle 35: Für die Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothese  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,5200K}^{RGBW}$  für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,5200K}^{RGBW}$
CIE1964 10°	4,7
6 nm nach links	6,7
5 nm nach links	6,4
4 nm nach links	6,1
3 nm nach links	5,7
2 nm nach links	5,3
1 nm nach links	5,0
1 nm nach rechts	4,5
2 nm nach rechts	4,4
3 nm nach rechts	4,4
4 nm nach rechts	4,6
5 nm nach rechts	4,8
6 nm nach rechts	5,3

Tabelle 36: Für die Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests sowie für die Nullhypothese  $\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,5200K}^{RGBW}$  für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,5200K}^{RGBW}$
CIE1964 10°	4,7
6 nm nach links	2,7
5 nm nach links	4,0
4 nm nach links	5,0
3 nm nach links	5,6
2 nm nach links	5,8
1 nm nach links	5,4
1 nm nach rechts	3,9
2 nm nach rechts	3,1
3 nm nach rechts	2,4
4 nm nach rechts	2,0
5 nm nach rechts	1,7
6 nm nach rechts	1,6

Tabelle 37: Für die Verschiebung der  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothese  $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
CIE1964 10°	1,9
6 nm nach links	27,9
5 nm nach links	21,8
4 nm nach links	16,3
3 nm nach links	11,4
2 nm nach links	7,2
1 nm nach links	4,1
1 nm nach rechts	2,9
2 nm nach rechts	4,6
3 nm nach rechts	6,5
4 nm nach rechts	9,4
5 nm nach rechts	12,4
6 nm nach rechts	15,4

Tabelle 38: Für die Verschiebung der  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothese  $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
CIE1964 10°	1,9
6 nm nach links	2,4
5 nm nach links	2,3
4 nm nach links	2,2
3 nm nach links	2,1
2 nm nach links	2,1
1 nm nach links	2,0
1 nm nach rechts	1,9
2 nm nach rechts	1,9
3 nm nach rechts	1,8
4 nm nach rechts	1,8
5 nm nach rechts	1,9
6 nm nach rechts	2,0

Tabelle 39: Für die Verschiebung der  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothese  $\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Es wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

	Nullhypothese
Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\mu_{2700K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
CIE1964 10°	1,9
6 nm nach links	1,9
5 nm nach links	1,9
4 nm nach links	2,0
3 nm nach links	2,0
2 nm nach links	2,1
1 nm nach links	2,1
1 nm nach rechts	1,6
2 nm nach rechts	1,0
3 nm nach rechts	0,3
4 nm nach rechts	-0,6
5 nm nach rechts	-1,6
6 nm nach rechts	-2,7

## Nullhypothese 2: $H_0: \mu_{\text{alternativ}} > \mu_{0\_1964}$

Tabelle 40: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$   $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

	Nullhypothesen	
Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	18,8	6,8
5 nm nach links	15,0	4,5
4 nm nach links	11,3	2,2
3 nm nach links	7,8	0,0
2 nm nach links	4,8	-1,7
1 nm nach links	2,8	-2,2
1 nm nach rechts	-0,9	2,2
2 nm nach rechts	1,1	4,1
3 nm nach rechts	4,2	6,6
4 nm nach rechts	7,7	9,2
5 nm nach rechts	11,4	11,9
6 nm nach rechts	15,3	14,6

Tabelle 41: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	20,5	14,1
5 nm nach links	16,0	10,6
4 nm nach links	11,9	7,2
3 nm nach links	8,2	4,2
2 nm nach links	5,1	1,5
1 nm nach links	2,9	-0,2
1 nm nach rechts	-1,1	1,8
2 nm nach rechts	0,4	4,1
3 nm nach rechts	3,2	6,7
4 nm nach rechts	6,1	9,5
5 nm nach rechts	9,3	12,3
6 nm nach rechts	12,5	15,0



Tabelle 42: Für die modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	2,3	0,03
5 nm nach links	1,9	0,01
4 nm nach links	1,5	0,01
3 nm nach links	1,1	0,01
2 nm nach links	0,7	0,01
1 nm nach links	0,3	0,02
1 nm nach rechts	-0,3	0,0
2 nm nach rechts	-0,5	-0,1
3 nm nach rechts	-0,7	-0,2
4 nm nach rechts	-0,8	-0,4
5 nm nach rechts	-0,9	-0,6
6 nm nach rechts	-0,8	-0,9

Tabelle 43: Für die modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_5200K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_5200K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	-0,3	2,2
5 nm nach links	-0,4	0,7
4 nm nach links	-0,4	-0,5
3 nm nach links	-0,4	-1,5
2 nm nach links	-0,3	-1,8
1 nm nach links	-0,2	-1,2
1 nm nach rechts	0,2	1,5
2 nm nach rechts	0,5	2,9
3 nm nach rechts	0,9	4,3
4 nm nach rechts	1,4	5,9
5 nm nach rechts	2,0	7,5
6 nm nach rechts	2,7	9,1

Tabelle 44: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$   $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	22,52	0,72
5 nm nach links	17,73	0,34
4 nm nach links	13,23	-0,07
3 nm nach links	9,08	-0,44
2 nm nach links	5,37	-0,68
1 nm nach links	2,37	-0,54
1 nm nach rechts	0,81	0,77
2 nm nach rechts	2,78	1,84
3 nm nach rechts	5,42	3,00
4 nm nach rechts	8,87	4,17
5 nm nach rechts	12,49	5,35
6 nm nach rechts	16,21	6,57

Tabelle 45: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	25,40	-0,17
5 nm nach links	19,51	-0,17
4 nm nach links	14,23	-0,15
3 nm nach links	9,55	-0,12
2 nm nach links	5,54	-0,09
1 nm nach links	2,33	-0,04
1 nm nach rechts	0,76	0,05
2 nm nach rechts	3,03	0,09
3 nm nach rechts	5,15	0,14
4 nm nach rechts	8,06	0,19
5 nm nach rechts	11,08	0,25
6 nm nach rechts	14,09	0,32

Tabelle 46: Für die modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	0,88	0,13
5 nm nach links	0,68	0,11
4 nm nach links	0,52	0,09
3 nm nach links	0,37	0,07
2 nm nach links	0,23	0,05
1 nm nach links	0,11	0,02
1 nm nach rechts	-0,10	-0,03
2 nm nach rechts	-0,18	-0,06
3 nm nach rechts	-0,25	-0,09
4 nm nach rechts	-0,30	-0,13
5 nm nach rechts	-0,31	-0,17
6 nm nach rechts	-0,28	-0,21

Tabelle 47: Für die modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$  und  $H_0: \mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,9;10) = 1,372$ ).

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGB}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGB}}$	$\mu_{\text{alternativ\_2700K}}^{\text{RGBW}} > \mu_{0\_1964\_2700K}^{\text{RGBW}}$
6 nm nach links	0,73	0,70
5 nm nach links	0,53	0,35
4 nm nach links	0,32	-0,03
3 nm nach links	0,14	-0,39
2 nm nach links	0,04	-0,63
1 nm nach links	-0,01	-0,52
1 nm nach rechts	0,08	0,77
2 nm nach rechts	0,24	1,84
3 nm nach rechts	0,47	3,03
4 nm nach rechts	0,77	4,25
5 nm nach rechts	1,13	5,48
6 nm nach rechts	1,53	6,79

### Nullhypothese 3: $H_0: \mu_{5200K} > \mu_{0\_2700K}$

Tabelle 48: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0\_2700K}^{RGB}$	$\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	-2,10	14,17
5 nm nach links	-1,41	10,65
4 nm nach links	-0,80	7,27
3 nm nach links	-0,27	4,14
2 nm nach links	0,24	1,41
1 nm nach links	1,15	-0,42
1 nm nach rechts	-0,68	1,53
2 nm nach rechts	-1,16	3,84
3 nm nach rechts	-0,87	6,42
4 nm nach rechts	-0,72	9,11
5 nm nach rechts	-0,51	11,82
6 nm nach rechts	-0,23	14,50

Tabelle 49: Für die modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$	$\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	2,44	-0,35
5 nm nach links	2,41	-0,34
4 nm nach links	2,31	-0,31
3 nm nach links	2,17	-0,28
2 nm nach links	2,00	-0,25
1 nm nach links	1,83	-0,21
1 nm nach rechts	1,56	-0,19
2 nm nach rechts	1,47	-0,22
3 nm nach rechts	1,44	-0,29
4 nm nach rechts	1,46	-0,41
5 nm nach rechts	1,52	-0,57
6 nm nach rechts	1,61	-0,78



Tabelle 50: Für die modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 2,5 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{5200K}^{RGB} > \mu_{0,2700K}^{RGB}$	$\mu_{5200K}^{RGBW} > \mu_{0,2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	0,02	0,99
5 nm nach links	0,39	0,03
4 nm nach links	0,79	-0,68
3 nm nach links	1,15	-1,10
2 nm nach links	1,40	-0,95
1 nm nach links	1,58	-0,52
1 nm nach rechts	1,73	0,05
2 nm nach rechts	1,78	-0,08
3 nm nach rechts	1,89	-0,37
4 nm nach rechts	2,10	-0,81
5 nm nach rechts	2,41	-1,45
6 nm nach rechts	2,82	-2,34

#### Nullhypothese 4: $H_0: \mu_w > \mu_{0_n}$

Tabelle 51: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$	$\mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$
6 nm nach links	3,08	3,33
5 nm nach links	3,11	3,34
4 nm nach links	3,12	3,22
3 nm nach links	3,07	2,80
2 nm nach links	2,80	1,74
1 nm nach links	2,92	-0,25
1 nm nach rechts	-1,08	1,75
2 nm nach rechts	1,19	2,50
3 nm nach rechts	2,72	2,80
4 nm nach rechts	2,89	2,93
5 nm nach rechts	2,89	2,97
6 nm nach rechts	2,86	2,96

Tabelle 52: Für die modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte t des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$	$\mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$
6 nm nach links	0,44	0,02
5 nm nach links	0,44	0,01
4 nm nach links	0,43	0,00
3 nm nach links	0,41	-0,01
2 nm nach links	0,38	0,00
1 nm nach links	0,34	0,01
1 nm nach rechts	-0,29	-0,04
2 nm nach rechts	-0,24	-0,08
3 nm nach rechts	-0,17	-0,12
4 nm nach rechts	-0,09	-0,17
5 nm nach rechts	0,00	-0,21
6 nm nach rechts	0,10	-0,24

Tabelle 53: Für die modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w\_5200K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGB}$	$\mu_{w\_5200K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_5200K}^{RGBW}$
6 nm nach links	0,04	1,52
5 nm nach links	0,01	1,14
4 nm nach links	-0,03	0,75
3 nm nach links	-0,07	0,20
2 nm nach links	-0,11	-0,55
1 nm nach links	-0,17	-1,16
1 nm nach rechts	0,22	1,46
2 nm nach rechts	0,30	1,49
3 nm nach rechts	0,39	1,51
4 nm nach rechts	0,49	1,51
5 nm nach rechts	0,60	1,48
6 nm nach rechts	0,70	1,42

Tabelle 54: Für die modifizierten  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichproben-tests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w,2700K}^{RGB} > \mu_{0,e,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,e,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{x}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w,2700K}^{RGB} > \mu_{0,e,2700K}^{RGB}$	$\mu_{w,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,e,2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	3,88	-0,01
5 nm nach links	3,82	-0,02
4 nm nach links	3,74	-0,03
3 nm nach links	3,61	-0,04
2 nm nach links	3,28	-0,04
1 nm nach links	2,33	-0,04
1 nm nach rechts	0,76	0,05
2 nm nach rechts	2,45	0,05
3 nm nach rechts	2,62	0,05
4 nm nach rechts	2,85	0,05
5 nm nach rechts	2,78	0,06
6 nm nach rechts	2,66	0,08

Tabelle 55: Für die modifizierten  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 5200 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w\_2700K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w\_2700K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{y}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w\_2700K}^{RGB} > \mu_{0\_e\_2700K}^{RGB}$	$\mu_{w\_2700K}^{RGBW} > \mu_{0\_e\_2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	0,22	0,02
5 nm nach links	0,18	0,02
4 nm nach links	0,16	0,02
3 nm nach links	0,14	0,02
2 nm nach links	0,13	0,02
1 nm nach links	0,11	0,02
1 nm nach rechts	-0,10	-0,03
2 nm nach rechts	-0,08	-0,03
3 nm nach rechts	-0,07	-0,03
4 nm nach rechts	-0,04	-0,04
5 nm nach rechts	-0,01	-0,04
6 nm nach rechts	0,04	-0,04

Tabelle 56: Für die modifizierten  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ -Kurven sind die Prüfwerte  $t$  des Einstichprobentests für die Nullhypothesen für die Abstände der 2700 K-Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Freiheitsgrade beträgt 10. Für  $H_0: \mu_{w,2700K}^{RGB} > \mu_{0,e,2700K}^{RGB}$  und  $H_0: \mu_{w,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,e,2700K}^{RGBW}$  wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 10 % ausgegangen ( $t(0,975;10) = 2,228$ ).

Verschiebung $\bar{z}_{10}(\lambda)$	Nullhypothesen	
	$\mu_{w,2700K}^{RGB} > \mu_{0,e,2700K}^{RGB}$	$\mu_{w,2700K}^{RGBW} > \mu_{0,e,2700K}^{RGBW}$
6 nm nach links	0,22	0,39
5 nm nach links	0,21	0,37
4 nm nach links	0,18	0,34
3 nm nach links	0,10	0,26
2 nm nach links	0,05	-0,09
1 nm nach links	-0,01	-0,52
1 nm nach rechts	0,08	0,77
2 nm nach rechts	0,15	1,07
3 nm nach rechts	0,21	1,20
4 nm nach rechts	0,27	1,27
5 nm nach rechts	0,32	1,32
6 nm nach rechts	0,36	1,36

## E. Zuweisung individueller Spektralwertfunktionen

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$

Tabelle 57: Abstände zwischen der 5200 K-Referenz und der RGB 5200 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		Clarke	Scott	Stephenson	Pirenne	Warburton	Eacell	D.C.Marks
TP 1	MW	4,6	2,6	2,3	2,0	1,8	1,5	1,1
	Konfidenzintervall	[4,0 ; 5,2]	[2,2 ; 3,0]	[1,7 ; 2,8]	[1,6 ; 2,3]	[1,4 ; 2,3]	[1,1 ; 1,9]	[0,7 ; 1,5]
TP 2	MW	2,4	4,0	0,5	3,1	2,3	3,1	1,6
	Konfidenzintervall	[2,1 ; 2,8]	[3,7 ; 4,4]	[0,1 ; 1,0]	[2,8 ; 3,4]	[2,0 ; 2,6]	[2,7 ; 3,4]	[1,3 ; 2,0]
TP 4	MW	5,6	2,5	3,5	2,9	3,2	1,7	2,1
	Konfidenzintervall	[5,3 ; 5,9]	[1,6 ; 3,5]	[3,4 ; 3,6]	[2,2 ; 3,5]	[2,7 ; 3,6]	[1,0 ; 2,3]	[1,9 ; 2,3]
TP 5	MW	5,1	1,8	2,9	1,7	2,1	0,7	1,4
	Konfidenzintervall	[4,6 ; 5,6]	[1,5 ; 2,1]	[2,5 ; 3,3]	[1,2 ; 2,2]	[1,7 ; 2,5]	[0,3 ; 1,0]	[1,2 ; 1,6]
TP 6	MW	5,0	2,2	2,6	1,7	1,9	1,0	1,2
	Konfidenzintervall	[4,4 ; 5,7]	[1,6 ; 2,9]	[1,9 ; 3,2]	[1,3 ; 2,2]	[1,7 ; 2,1]	[0,3 ; 1,6]	[0,9 ; 1,6]
TP 7	MW	6,6	0,7	4,4	1,5	2,6	1,4	2,9
	Konfidenzintervall	[5,6 ; 7,5]	[0,5 ; 1,0]	[3,6 ; 5,2]	[0,8 ; 2,2]	[1,9 ; 3,3]	[0,8 ; 2,0]	[2,2 ; 3,6]
TP 8	MW	4,2	3,2	2,1	1,9	0,9	2,6	2,2
	Konfidenzintervall	[3,3 ; 5,1]	[2,5 ; 4,0]	[1,3 ; 2,9]	[1,0 ; 2,7]	[0,3 ; 1,6]	[2,0 ; 3,2]	[1,9 ; 2,5]
TP 9	MW	5,6	2,0	3,5	1,4	1,9	1,6	2,3
	Konfidenzintervall	[4,8 ; 6,5]	[1,3 ; 2,8]	[2,8 ; 4,1]	[0,0 ; 3,1]	[0,2 ; 3,5]	[1,0 ; 2,1]	[2,0 ; 2,6]



TP 12	MW	0,6	6,6	2,7	5,4	4,6	5,7	4,3
	Konfidenzintervall	[0,1 ; 1,1]	[6,1 ; 7,1]	[2,1 ; 3,3]	[4,9 ; 6,0]	[4,0 ; 5,1]	[5,2 ; 6,1]	[3,8 ; 4,7]
TP 13	MW	6,2	2,2	4,0	2,8	3,3	1,6	2,4
	Konfidenzintervall	[5,9 ; 6,4]	[1,6 ; 2,9]	[3,6 ; 4,3]	[2,1 ; 3,4]	[2,8 ; 3,9]	[1,0 ; 2,2]	[2,0 ; 2,8]

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Tabelle 58: Abstände zwischen der 5200 K-Referenz und der RGBW 5200 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farbig hinterlegt sind die Mittelwerte die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		R.N. Wilson	E.M. Kin- rade	Collins	Clarke	Colkin	Berrb	Warburton	W.D. Wright
TP1	MW	1,2	0,8	1,0	1,3	0,9	0,8	2,3	0,8
	Konfidenzintervall	[0,8 ; 1,6]	[0,5 ; 1,1]	[0,7 ; 1,4]	[0,9 ; 1,6]	[0,5 ; 1,2]	[0,6 ; 1,0]	[1,8 ; 2,8]	[0,5 ; 1,2]
TP2	MW	1,3	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	2,0	0,6
	Konfidenzintervall	[1,1 ; 1,5]	[0,1 ; 0,8]	[0,3 ; 0,7]	[0,4 ; 1,0]	[0,3 ; 0,9]	[0,1 ; 1,2]	[1,6 ; 2,3]	[0,3 ; 1,0]
TP4	MW	1,3	1,1	1,6	1,6	1,0	1,9	1,3	0,9
	Konfidenzintervall	[0,7 ; 1,9]	[0,5 ; 1,8]	[1,2 ; 2,0]	[1,3 ; 1,9]	[0,5 ; 1,7]	[1,3 ; 2,7]	[0,5 ; 2,1]	[0,3 ; 1,7]
TP5	MW	1,2	0,4	0,6	0,7	0,4	1,0	1,7	0,5
	Konfidenzintervall	[1,0 ; 1,4]	[0,1 ; 0,6]	[0,5 ; 0,8]	[0,7 ; 0,8]	[0,2 ; 0,6]	[0,5 ; 1,4]	[1,5 ; 1,9]	[0,3 ; 0,6]
TP6	MW	1,7	0,9	0,8	1,1	1,0	0,5	2,6	1,1
	Konfidenzintervall	[1,5 ; 1,9]	[0,8 ; 1,0]	[0,6 ; 1,0]	[0,9 ; 1,3]	[0,9 ; 1,1]	[0,3 ; 0,6]	[2,4 ; 2,8]	[0,9 ; 1,2]
TP7	MW	0,9	1,4	1,9	2,1	1,4	1,5	2,5	1,3
	Konfidenzintervall	[0,3 ; 1,6]	[0,8 ; 2,1]	[1,3 ; 2,4]	[1,5 ; 2,6]	[0,7 ; 2,0]	[1,3 ; 1,8]	[1,9 ; 3,2]	[0,6 ; 1,9]
TP8	MW	1,7	0,7	0,6	0,8	0,7	0,9	2,2	0,9
	Konfidenzintervall	[1,3 ; 2,1]	[0,3 ; 1,1]	[0,4 ; 0,9]	[0,6 ; 1,0]	[0,3 ; 1,2]	[0,6 ; 1,3]	[1,7 ; 2,7]	[0,5 ; 1,4]
TP9	MW	2,4	2,2	2,5	2,3	2,1	3,3	1,0	2,1
	Konfidenzintervall	[1,1 ; 3,7]	[0,6 ; 3,9]	[0,8 ; 4,2]	[0,7 ; 4,0]	[0,5 ; 3,6]	[1,6 ; 5,0]	[0,1 ; 1,9]	[0,5 ; 3,6]
TP1	MW	2,3	1,3	0,7	0,6	1,2	1,3	2,3	1,5

2	Konfidenz-intervall	[2,0 ; 2,6]	[1,0 ; 1,6]	[0,3 ; 1,1]	[0,3 ; 0,9]	[0,9 ; 1,5]	[0,8 ; 1,8]	[1,7 ; 2,8]	[1,2 ; 1,8]
TP1	MW	1,1	0,5	1,0	1,0	0,4	1,4	1,5	0,5
3	Konfidenz-intervall	[0,9 ; 1,3]	[0,3 ; 0,7]	[0,7 ; 1,2]	[0,8 ; 1,3]	[0,2 ; 0,6]	[1,1 ; 1,7]	[1,2 ; 1,9]	[0,4 ; 0,6]

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$

Tabelle 59: Abstände zwischen der 2700 K-Referenz und der RGB 2700 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		Brindleb	Gibbs	Burch	R.N. Wilson	D.C.Marks	Tilleard
TP1	MW	5,5	2,4	4,6	2,7	1,5	2,9
	Konfidenz-intervall	[4,9 ; 6,2]	[1,2 ; 3,5]	[3,6 ; 5,5]	[1,8 ; 3,7]	[0,2 ; 2,8]	[2,2 ; 3,6]
TP4	MW	0,9	3,5	1,2	3,0	4,5	2,8
	Konfidenz-intervall	[0,9 ; 0,9]	[3,5 ; 3,5]	[1,2 ; 1,2]	[3,0 ; 3,0]	[4,5 ; 4,5]	[2,8 ; 2,8]
TP6	MW	3,8	0,8	2,6	0,7	1,2	1,1
	Konfidenz-intervall	[3,3 ; 4,3]	[0,6 ; 1,1]	[2,2 ; 3,1]	[0,1 ; 1,3]	[0,6 ; 1,8]	[0,6 ; 1,7]
TP7	MW	2,8	1,7	2,1	0,6	2,3	0,1
	Konfidenz-intervall	[2,6 ; 2,9]	[1,5 ; 1,9]	[2,1 ; 2,1]	[0,4 ; 0,8]	[2,1 ; 2,5]	[0,0 ; 0,3]
TP8	MW	5,7	2,2	4,6	3,0	1,3	3,3
	Konfidenz-intervall	[5,6 ; 5,9]	[1,8 ; 2,6]	[4,2 ; 4,9]	[2,9 ; 3,2]	[1,1 ; 1,6]	[3,2 ; 3,3]
TP9	MW	2,0	3,2	1,4	2,8	4,2	2,7
	Konfidenz-intervall	[0,9 ; 3,0]	[2,8 ; 3,6]	[1,3 ; 1,5]	[1,8 ; 3,9]	[3,6 ; 4,7]	[1,4 ; 4,0]
TP10	MW	5,5	3,0	4,1	3,8	3,1	4,1
	Konfidenz-intervall	[4,7 ; 6,2]	[2,6 ; 3,4]	[3,1 ; 5,0]	[3,4 ; 4,2]	[1,8 ; 4,5]	[3,7 ; 4,5]
TP12	MW	7,3	4,0	6,1	4,9	3,4	5,1
	Konfidenz-intervall	[5,4 ; 9,2]	[1,7 ; 6,3]	[3,9 ; 8,4]	[2,9 ; 6,8]	[1,4 ; 5,4]	[3,4 ; 6,8]
TP13	MW	1,4	5,1	3,4	4,2	5,8	3,8
	Konfidenz-intervall	[0,8 ; 2,0]	[4,7 ; 5,5]	[2,9 ; 3,8]	[3,9 ; 4,5]	[5,5 ; 6,1]	[3,5 ; 4,1]
TP15	MW	5,7	2,0	4,6	2,9	1,2	3,2
	Konfidenz-intervall	[4,6 ; 6,8]	[0,6 ; 3,4]	[3,3 ; 5,8]	[1,7 ; 4,1]	[0,0 ; 2,5]	[2,2 ; 4,3]

## Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$

Tabelle 60: Abstände zwischen der 2700 K-Referenz und der RGBW 2700 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farbig hinterlegt sind die Mittelwerte die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		Grab	Fowler	Tolmon	Hillman	Woodhouse	Williams	Berrb	Peters	Dent
TP 1	MW	1,3	1,1	1,1	0,7	1,4	0,9	1,2	1,9	1,5
	Konfidenzintervall	[1,1;1,5]	[0,2;2,0]	[0,3;1,8]	[0,1;1,3]	[0,7;2,1]	[0,3;1,4]	[0,2;2,2]	[0,9;3,0]	[0,9;2,1]
TP 4	MW	1,9	0,2	0,9	1,0	1,4	0,9	2,3	1,1	2,3
	Konfidenzintervall	[1,9;1,9]	[0,2;0,2]	[0,9;0,9]	[1,0;1,0]	[1,4;1,4]	[0,9;0,9]	[2,3;2,3]	[1,1;1,1]	[2,3;2,3]
TP 6	MW	0,1	1,6	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	2,2	0,6
	Konfidenzintervall	[0,1;0,1]	[1,6;1,7]	[1,0;1,2]	[1,1;1,2]	[0,9;1,2]	[0,9;1,0]	[1,0;1,2]	[2,1;2,3]	[0,5;0,7]
TP 7	MW	1,1	0,7	0,2	0,8	0,6	0,4	1,8	1,3	1,7
	Konfidenzintervall	[1,0;1,3]	[0,6;0,7]	[0,0;0,4]	[0,5;1,1]	[0,4;0,8]	[0,1;0,6]	[1,6;2,0]	[1,1;1,5]	[1,5;1,8]
TP 8	MW	1,1	0,7	0,5	0,6	1,0	0,4	1,5	1,5	1,6
	Konfidenzintervall	[1,0;1,3]	[0,4;1,1]	[0,0;1,1]	[0,0;1,1]	[0,5;1,5]	[0,4;0,5]	[1,0;2,1]	[0,9;2,1]	[1,2;1,9]
TP 9	MW	3,3	2,6	2,4	3,3	2,2	2,9	4,1	1,9	3,7
	Konfidenzintervall	[1,8;4,8]	[1,7;3,6]	[1,2;3,7]	[2,1;4,5]	[0,8;3,7]	[1,6;4,2]	[2,8;5,5]	[1,3;2,6]	[2,3;5,2]
TP 10	MW	1,5	1,1	0,7	1,5	0,5	1,1	2,4	1,0	2,0
	Konfidenzintervall	[0,9;2,1]	[1,1;1,2]	[0,3;1,0]	[1,1;1,9]	[0,0;1,1]	[0,7;1,5]	[1,8;2,9]	[0,4;1,5]	[1,4;2,6]
TP 12	MW	1,0	2,1	1,7	1,3	1,9	1,5	0,5	2,9	0,6
	Konfidenzintervall	[0,6;1,3]	[1,5;2,6]	[1,3;2,2]	[0,7;2,0]	[1,4;2,3]	[0,9;2,0]	[0,3;0,7]	[2,3;3,4]	[0,5;0,7]
TP 13	MW	2,0	3,0	2,6	2,4	2,7	2,5	2,0	3,7	1,8
	Konfidenzintervall	[0,0;4,3]	[1,2;4,8]	[0,5;4,8]	[0,9;3,9]	[0,1;5,2]	[0,5;4,5]	[1,1;2,9]	[1,6;5,9]	[0,2;3,4]

## F. Gruppierungen individuell zugewiesener Spektralwertfunktionen

### Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$

Tabelle 61: Mögliche Gruppierungen von Testpersonen, die für bestimmte Spektralwertfunktionen unter Berücksichtigung der 95 % Konfidenzintervalle vergleichbare  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$  berechnen. In dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn eine Funktion mehr als einer Testperson zugewiesen werden kann.

	TP1	TP2	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
F. H. C. Marriott	X			X			X	
R. N. Wilson			X	X	X		X	
E. M. Kinrade			X	X			X	
E. M. Love	X			X			X	
P. M. Eacell			X	X				
J. Woodhouse	X			X			X	
W. D. Wright					X	X		X

### Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Tabelle 62: Mögliche Gruppierungen von Testpersonen, die für bestimmte Spektralwertfunktionen unter Berücksichtigung der 95 % Konfidenzintervalle vergleichbare  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$  berechnen. In dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn eine Funktion mehr als einer Testperson zugewiesen werden kann.

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
J. E. Gibbs		X		X			X	X		X
R. N. Wilson	X		X			X				
D. C. Marks			X			X		X		
E. M. Kinrade		X		X			X			X
J. M. Vigil		X					X	X	X	
N. M. Geragling		X					X		X	
P. A. Grab	X		X			X		X		
J. B. Collins		X					X		X	
K. H. Spring		X		X			X	X		X
M. C. Boshoff		X					X		X	
M. G. Clarke		X					X		X	
R. B. Colkin		X		X			X			X
Bowles		X			X		X		X	
W. D. Wright	X	X	X	X			X			

## Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$

Tabelle 63: Mögliche Gruppierungen von Testpersonen, die für bestimmte Spektralwertfunktionen unter Berücksichtigung der 95 % Konfidenzintervalle vergleichbare  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$  berechnen. In dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn eine Funktion mehr als einer Testperson zugewiesen werden kann.

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
F. H. C. Marriott				X	X			X		
G. S. Brindleb	X				X					

## Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$

Tabelle 64: Mögliche Gruppierungen von Testpersonen, die für bestimmte Spektralwertfunktionen unter Berücksichtigung der 95 % Konfidenzintervalle vergleichbare  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$  berechnen. In dieser Arbeit wird von einer Gruppe gesprochen, wenn eine Funktion mehr als einer Testperson zugewiesen werden kann.

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
F. H. C. Marriott								X		X
J. E. Gibbs		X		X				X		X
W. S. Stiles	X						X	X		
D. C. Marks								X		X
D. L. Tilleard	X						X	X		
W. F. Earl								X	X	X
F. J. J. Clarke	X						X		X	
K. H. Spring	X	X		X			X	X		
K. J. McCree	X						X	X		
R. B. Colkin		X		X			X			
Warburton	X						X	X		
W. S. Stiles	X						X	X		

## G. Zuweisung der modifizierten Normspektralwertfunktionen

$$\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$$

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$

Tabelle 65: Abstände zwischen der 5200 K-Referenz und der RGB 5200 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		$\bar{x}_{10}(\lambda-1\text{nm})$	$\bar{x}_{10}(\lambda+1\text{nm})$	$\bar{x}_{10}(\lambda+2\text{nm})$	$\bar{z}_{10}(\lambda-6\text{nm})$	$\bar{z}_{10}(\lambda+2\text{nm})$
TP1	MW	3,85	1,41	2,63	2,20	2,39
	Konfidenzintervall	[3,23 ; 4,46]	[0,99 ; 1,82]	[2,20 ; 3,05]	[1,64 ; 2,76]	[1,77 ; 3,01]
TP2	MW	2,08	2,53	4,16	0,52	1,81
	Konfidenzintervall	[1,61 ; 2,55]	[2,23 ; 2,83]	[3,79 ; 4,54]	[0,23 ; 0,81]	[1,44 ; 2,19]
TP4	MW	5,16	2,55	2,52	3,43	3,92
	Konfidenzintervall	[4,84 ; 5,47]	[2,03 ; 3,08]	[1,56 ; 3,49]	[3,30 ; 3,56]	[3,56 ; 4,28]
TP5	MW	4,39	1,35	1,80	2,82	2,94
	Konfidenzintervall	[3,97 ; 4,82]	[0,91 ; 1,79]	[1,50 ; 2,09]	[2,48 ; 3,15]	[2,58 ; 3,30]
TP6	MW	4,20	1,26	2,29	2,48	2,64
	Konfidenzintervall	[3,63 ; 4,78]	[0,94 ; 1,59]	[1,60 ; 2,98]	[1,82 ; 3,14]	[2,21 ; 3,07]
TP7	MW	5,52	2,03	0,79	4,24	3,78
	Konfidenzintervall	[4,65 ; 6,39]	[1,34 ; 2,72]	[0,64 ; 0,95]	[3,46 ; 5,03]	[3,00 ; 4,57]
TP8	MW	2,86	1,63	3,46	2,30	1,01
	Konfidenzintervall	[1,99 ; 3,74]	[0,96 ; 2,29]	[2,64 ; 4,29]	[1,68 ; 2,92]	[0,41 ; 1,62]
TP9	MW	4,69	1,56	2,08	3,42	2,97
	Konfidenzintervall	[3,50 ; 5,87]	[0,33 ; 2,78]	[1,29 ; 2,86]	[2,81 ; 4,04]	[1,54 ; 4,41]

TP12	MW	1,75	5,03	6,83	2,67	3,54
	Konfidenzintervall	[1,10 ; 2,40]	[4,48 ; 5,58]	[6,34 ; 7,32]	[2,16 ; 3,19]	[2,90 ; 4,19]
TP13	MW	5,59	2,58	2,13	3,88	4,20
	Konfidenzintervall	[5,22 ; 5,95]	[1,99 ; 3,18]	[1,44 ; 2,82]	[3,54 ; 4,23]	[3,74 ; 4,67]

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Tabelle 66: Abstände zwischen der 5200 K-Referenz und der RGBW 5200 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		$\bar{x}10(\lambda-2nm)$	$\bar{z}10(\lambda-5nm)$	$\bar{z}10(\lambda-4nm)$	$\bar{z}10(\lambda-3nm)$	$\bar{z}10(\lambda-2nm)$	$\bar{z}10(\lambda+1nm)$
TP1	MW	2,02	1,04	0,88	0,88	1,09	2,12
	Konfidenzintervall	[1,60;2,44]	[0,81;1,27]	[0,59;1,16]	[0,47;1,29]	[0,62;1,57]	[1,63;2,61]
TP2	MW	1,39	1,37	1,13	1,00	1,01	1,72
	Konfidenzintervall	[1,03;1,75]	[1,07;1,66]	[0,97;1,28]	[0,87;1,12]	[0,72;1,30]	[1,32;2,12]
TP4	MW	1,86	1,67	1,34	1,08	0,99	1,23
	Konfidenzintervall	[1,54;2,19]	[0,69;2,65]	[0,47;2,20]	[0,34;1,82]	[0,43;1,55]	[0,51;1,95]
TP5	MW	1,36	1,39	1,07	0,86	0,81	1,49
	Konfidenzintervall	[1,16;1,56]	[0,92;1,87]	[0,70;1,45]	[0,62;1,10]	[0,64;0,98]	[1,22;1,77]
TP6	MW	1,99	1,33	1,20	1,24	1,44	2,37
	Konfidenzintervall	[1,78;2,20]	[1,10;1,56]	[0,99;1,40]	[1,07;1,42]	[1,28;1,60]	[2,19;2,55]
TP7	MW	2,71	0,64	0,65	0,92	1,34	2,50
	Konfidenzintervall	[2,09;3,33]	[0,15;1,12]	[0,01;1,30]	[0,13;1,70]	[0,59;2,09]	[1,81;3,19]
TP8	MW	1,58	1,66	1,39	1,23	1,22	1,93

	Konfidenz-intervall	[1,29;1,87]	[1,38;1,93]	[1,07;1,70]	[0,85;1,61]	[0,75;1,68]	[1,45;2,42]
TP9	MW	2,15	3,37	2,92	2,46	2,02	1,16
	Konfidenz-intervall	[0,63;3,66]	[1,86;4,88]	[1,42;4,41]	[0,98;3,95]	[0,56;3,49]	[0,02;2,31]
TP12	MW	1,07	2,24	1,98	1,79	1,67	1,87
	Konfidenz-intervall	[0,64;1,49]	[1,92;2,57]	[1,70;2,26]	[1,52;2,05]	[1,37;1,98]	[1,30;2,43]
TP13	MW	1,54	1,49	1,09	0,78	0,60	1,31
	Konfidenz-intervall	[1,25;1,82]	[1,13;1,85]	[0,76;1,41]	[0,62;0,94]	[0,42;0,78]	[0,91;1,71]

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$

Tabelle 67: Abstände zwischen der 2700 K-Referenz und der RGB 2700 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		$\bar{x}_{10}(\lambda-1nm)$	$\bar{x}_{10}(\lambda+1nm)$	$\bar{x}_{10}(\lambda+2nm)$	$\bar{x}_{10}(\lambda+3nm)$	$\bar{y}_{10}(\lambda+2nm)$	$\bar{z}_{10}(\lambda-6nm)$	$\bar{z}_{10}(\lambda-3nm)$	$\bar{z}_{10}(\lambda+6nm)$
TP1	MW	2,99	3,28	4,92	6,59	2,20	0,98	1,52	3,47
	Konfidenz-intervall	[1,96; 4,03]	[2,38; 4,18]	[4,35; 5,50]	[6,18; 7,01]	[0,86; 3,54]	[0,53; 2,49]	[0,07; 2,98]	[2,40; 4,54]
TP6	MW	3,84	0,19	2,04	3,87	1,88	2,57	2,22	2,38
	Konfidenz-intervall	[3,68; 4,00]	[0,16; 0,23]	[1,86; 2,21]	[3,71; 4,03]	[1,72; 2,05]	[2,42; 2,7]	[2,05; 2,39]	[2,27; 2,48]
TP7	MW	3,05	4,35	5,87	7,44	3,12	3,78	3,48	2,66
	Konfidenz-intervall	[1,79; 4,31]	[3,99; 4,72]	[5,64; 6,11]	[7,16; 7,72]	[2,26; 3,99]	[1,48; 6,07]	[1,86; 5,09]	[1,77; 3,56]
TP8	MW	3,02	1,34	3,39	5,28	0,94	1,72	1,19	1,94
	Konfidenz-intervall	[2,52; 3,51]	[0,74; 1,94]	[2,86; 3,93]	[4,78; 5,77]	[0,49; 1,38]	[1,16; 2,27]	[0,59; 1,80]	[1,92; 1,96]
TP9	MW	2,25	5,42	7,12	8,74	3,59	3,40	3,47	4,54
	Konfidenz-intervall	[1,04; 5,54]	[3,49; 7,35]	[5,51; 8,74]	[7,32; 10,17]	[1,05; 6,13]	[1,79; 5,00]	[1,35; 5,59]	[2,00; 7,07]
TP10	MW	5,23	2,69	2,93	4,36	3,69	5,00	4,41	2,66
	Konfidenz-intervall	[5,06; 5,39]	[1,17; 4,21]	[0,94; 4,93]	[2,68; 6,03]	[2,99; 4,39]	[3,94; 6,06]	[3,53; 5,29]	[2,32; 3,0]
TP12	MW	6,99	3,69	2,05	1,58	5,16	6,02	5,70	4,98



	Konfidenz-intervall	[6,60; 7,38]	[3,41; 3,96]	[2,01; 2,10]	[1,13; 2,03]	[4,82; 5,50]	[5,81; 6,24]	[5,42; 5,98]	[4,51; 5,4]
TP13	MW	1,77	3,59	5,45	7,22	1,76	1,11	1,32	3,08
	Konfidenz-intervall	[1,00; 2,53]	[3,47; 3,71]	[5,45; 5,46]	[7,16; 7,27]	[1,19; 2,34]	[0,91; 1,31]	[1,03; 1,62]	[2,53; 3,6]
TP15	MW	2,10	3,54	5,52	7,36	1,53	1,37	1,29	2,93
	Konfidenz-intervall	[1,88; 2,31]	[2,41; 4,68]	[4,60; 6,44]	[6,57; 8,16]	[0,05; 3,12]	[1,10; 1,64]	[0,17; 2,41]	[1,57; 4,28]

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$

Tabelle 68: Abstände zwischen der 2700 K-Referenz und der RGBW 2700 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den Spektralwertfunktionen aus den Versuchen von Stiles und Burch bewertet. Farbig hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

		$\bar{y}_{10}(\lambda+6n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda-6n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda-5n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda-4n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda-2n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda-1n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda+1n$ m)	$\bar{z}_{10}(\lambda+4n$ m)
TP1	MW	1,02	1,43	1,23	1,09	0,86	0,91	1,32	2,64
	Konfidenz-intervall	[0,03;2,00]	[0,37;2,48]	[0,35;2,12]	[0,45;1,73]	[0,28;1,44]	[0,21;1,61]	[0,20;2,44]	[1,61;3,66]
TP6	MW	0,34	2,02	1,72	1,40	0,70	0,40	0,79	2,11
	Konfidenz-intervall	[0,30;0,38]	[1,78;2,26]	[1,47;1,97]	[1,14;1,65]	[0,41;0,99]	[0,11;0,70]	[0,70;0,87]	[1,96;2,26]
TP7	MW	0,86	2,55	2,27	1,99	1,42	1,19	1,06	1,86
	Konfidenz-intervall	[0,60;1,12]	[1,89;3,21]	[1,63;2,92]	[1,36;2,61]	[0,89;1,94]	[0,79;1,59]	[0,95;1,18]	[1,29;2,43]
TP8	MW	1,45	1,04	0,85	0,73	0,93	1,20	1,90	3,09
	Konfidenz-intervall	[1,34;1,55]	[0,88;1,20]	[0,71;0,99]	[0,63;0,83]	[0,90;0,96]	[1,14;1,27]	[1,80;1,99]	[2,99;3,19]
TP9	MW	2,08	0,50	0,48	0,67	1,35	1,72	2,48	3,68
	Konfidenz-intervall	[1,46;2,71]	[0,39;0,61]	[0,07;1,03]	[0,04;1,39]	[0,68;2,02]	[1,07;2,37]	[1,87;3,09]	[3,13;4,23]
TP10	MW	2,51	4,43	4,18	3,90	3,33	3,05	2,54	2,19
	Konfidenz-intervall	[1,12;3,90]	[2,81;6,06]	[2,57;5,78]	[2,33;5,48]	[1,87;4,80]	[1,68;4,42]	[1,50;3,59]	[2,15;2,24]
TP12	MW	3,03	2,10	2,15	2,23	2,58	2,83	3,45	4,51
	Konfidenz-intervall	[0,84;5,22]	[0,93;3,26]	[0,69;3,60]	[0,53;3,94]	[0,57;4,59]	[0,77;4,90]	[1,38;5,52]	[2,57;6,46]
TP13	MW	0,52	1,76	1,46	1,14	0,52	0,47	0,94	2,25
	Konfidenz-intervall	[0,00;1,05]	[1,17;2,35]	[0,87;2,05]	[0,55;1,74]	[0,03;1,00]	[0,45;0,49]	[0,42;1,46]	[1,74;2,77]

## Gruppierungen individuell zugewiesene $\bar{x}_{10}(\lambda)$ , $\bar{y}_{10}(\lambda)$ , $\bar{z}_{10}(\lambda)$ Spektralwertfunktionen

### Gruppierungen für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$

Tabelle 69: Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGB}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Signifikanz von 2,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

	TP1	TP2	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
$\bar{x}_{10}(\lambda+1nm)$	X		X	X		X	X	

### Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$

Tabelle 70: Abstände  $\Delta \bar{E}_{5200K}^{RGBW}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Signifikanz von 2,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
$\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$			X				X		X
$\bar{x}_{10}(\lambda-1nm)$		X		X		X	X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-6nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda-5nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda-4nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda-3nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda-2nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda-1nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+1nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+2nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+3nm)$			X				X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+4nm)$			X	X			X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+5nm)$		X	X	X			X		X
$\bar{y}_{10}(\lambda+6nm)$		X	X	X			X	X	X
$\bar{z}_{10}(\lambda-4nm)$	X		X		X				
$\bar{z}_{10}(\lambda-3nm)$	X		X	X	X	X			
$\bar{z}_{10}(\lambda-2nm)$			X		X		X		X
$\bar{z}_{10}(\lambda+1nm)$			X				X		
$\bar{z}_{10}(\lambda+2nm)$			X				X		
$\bar{z}_{10}(\lambda+3nm)$			X				X		

## Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$

Tabelle 71: Abstände  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGB}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Signifikanz von 2,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

	TP1	TP2	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
$\bar{y}_{10}(\lambda+6nm)$			X		X		X	

## Gruppierung für den mittleren Abstand $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$

Tabelle 72: Abstände  $\Delta \bar{E}_{2700K}^{RGBW}$ , die für diverse Testpersonen unter Verwendung derselben Spektralwertfunktion einen vergleichbaren Abstand errechnen. Wenn für mehrere Testpersonen dieselben Funktionen markiert sind, hat die entsprechende Funktion für diese Testpersonen mit einer Signifikanz von 2,5 % einen gleich großen Abstand berechnet. Es wird von einem 95 % Konfidenzintervall ausgegangen.

	TP1	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12
$\bar{x}_{10}(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda)$	X				X	X	
$\bar{x}_{10}(\lambda-1nm)$	X				X	X	
$\bar{x}_{10}(\lambda+1nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-6nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-5nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-4nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-3nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-2nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda-1nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+1nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+2nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+3nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+4nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+5nm)$	X				X	X	
$\bar{y}_{10}(\lambda+6nm)$				X	X	X	
$\bar{z}_{10}(\lambda-3nm)$	X	X	X		X		X
$\bar{z}_{10}(\lambda+1nm)$	X				X	X	

## H. Zuweisung der modifizierten $\bar{l}_{10}(\lambda)$ , $\bar{m}_{10}(\lambda)$ , $\bar{s}_{10}(\lambda)$ Spektralwertfunktionen

### Mittlerer Abstand $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGB}$

Tabelle 73: Abstände  $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGB}$  zwischen der 5200 K Referenz und der RGB 5200 K Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den modifizierten  $\bar{l}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{m}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{s}_{10}(\lambda)$  Spektralwertfunktionen bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

			$\bar{l}_{10}(\lambda)$ $\bar{m}_{10}(\lambda)$ $\bar{s}_{10}(\lambda)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-4nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-3nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-2nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-1nm)$
TP1	MW		0,0058	0,0076	0,0048	0,0027	0,0033
	Konfidenzintervall	UG	0,0051	0,0067	0,0039	0,0017	0,0026
		OG	0,0065	0,0084	0,0057	0,0036	0,0040
TP2	MW		0,0087	0,0051	0,0034	0,0038	0,0060
	Konfidenzintervall	UG	0,0082	0,0042	0,0023	0,0030	0,0054
		OG	0,0092	0,0061	0,0045	0,0047	0,0066
TP4	MW		0,0062	0,0098	0,0074	0,0055	0,0048
	Konfidenzintervall	UG	0,0040	0,0091	0,0066	0,0042	0,0026
		OG	0,0084	0,0104	0,0082	0,0068	0,0070
TP5	MW		0,0046	0,0087	0,0059	0,0033	0,0023
	Konfidenzintervall	UG	0,0037	0,0085	0,0055	0,0026	0,0010
		OG	0,0055	0,0090	0,0063	0,0041	0,0036
TP6	MW		0,0050	0,0077	0,0049	0,0025	0,0022
	Konfidenzintervall	UG	0,0038	0,0067	0,0040	0,0022	0,0010
		OG	0,0061	0,0087	0,0058	0,0028	0,0033
TP7	MW		0,0027	0,0106	0,0076	0,0047	0,0020
	Konfidenzintervall	UG	0,0018	0,0099	0,0069	0,0039	0,0010
		OG	0,0036	0,0112	0,0083	0,0054	0,0031
TP8	MW		0,0066	0,0064	0,0038	0,0026	0,0039
	Konfidenzintervall	UG	0,0055	0,0048	0,0022	0,0020	0,0031
		OG	0,0077	0,0081	0,0054	0,0032	0,0048
TP9	MW		0,0049	0,0093	0,0066	0,0042	0,0033
	Konfidenzintervall	UG	0,0040	0,0086	0,0058	0,0032	0,0020
		OG	0,0059	0,0100	0,0074	0,0052	0,0046
TP12	MW		0,0128	0,0041	0,0051	0,0073	0,0100
	Konfidenzintervall	UG	0,0115	0,0027	0,0034	0,0058	0,0086
		OG	0,0140	0,0055	0,0068	0,0089	0,0113
TP13	MW		0,0053	0,0098	0,0071	0,0048	0,0038
	Konfidenzintervall	UG	0,0038	0,0091	0,0062	0,0034	0,0020
		OG	0,0068	0,0105	0,0080	0,0061	0,0056

## Mittlerer Abstand $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGBW}$

Tabelle 74: Abstände  $\Delta \bar{lm}_{5200K}^{RGBW}$  zwischen der 5200 K Referenz und der RGBW 5200K Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den modifizierten  $\bar{l}_{10}(\lambda), \bar{m}_{10}(\lambda), \bar{s}_{10}(\lambda)$  Spektralwertfunktionen bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

			$\bar{l}_{10}(\lambda)$ $\bar{m}_{10}(\lambda)$ $\bar{s}_{10}(\lambda)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-4nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-3nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-2nm)$	$\bar{m}_{10}(\lambda-1nm)$	$\bar{s}_{10}(\lambda-2nm)$	$\bar{s}_{10}(\lambda-1nm)$	$\bar{s}_{10}(\lambda+4nm)$
TP1	MW		0,0020	0,0027	0,0023	0,0020	0,0019	0,0014	0,0013	0,0060
	Konfidenzintervall	UG	0,0011	0,0019	0,0015	0,0011	0,0009	0,0009	0,0007	0,0051
		OG	0,0029	0,0035	0,0031	0,0028	0,0027	0,0019	0,0020	0,0069
TP2	MW		0,0017	0,0016	0,0013	0,0012	0,0014	0,0020	0,0016	0,0054
	Konfidenzintervall	UG	0,0010	0,0008	0,0004	0,0002	0,0005	0,0010	0,0011	0,0043
		OG	0,0024	0,0024	0,0022	0,0021	0,0022	0,0031	0,0020	0,0064
TP4	MW		0,0028	0,0036	0,0032	0,0028	0,0026	0,0039	0,0032	0,0038
	Konfidenzintervall	UG	0,0011	0,0022	0,0016	0,0010	0,0007	0,0013	0,0009	0,0019
		OG	0,0047	0,0051	0,0049	0,0048	0,0047	0,0068	0,0057	0,0060
TP5	MW		0,0015	0,0017	0,0012	0,0009	0,0011	0,0023	0,0016	0,0047
	Konfidenzintervall	UG	0,0011	0,0014	0,0008	0,0003	0,0005	0,0013	0,0008	0,0038
		OG	0,0018	0,0020	0,0016	0,0014	0,0015	0,0033	0,0022	0,0055
TP6	MW		0,0024	0,0022	0,0020	0,0019	0,0020	0,0014	0,0016	0,0062
	Konfidenzintervall	UG	0,0021	0,0018	0,0016	0,0015	0,0017	0,0010	0,0013	0,0059
		OG	0,0026	0,0027	0,0024	0,0023	0,0023	0,0018	0,0018	0,0065
TP7	MW		0,0030	0,0045	0,0040	0,0036	0,0032	0,0017	0,0020	0,0070
	Konfidenzintervall	UG	0,0008	0,0026	0,0020	0,0015	0,0010	0,0001	0,0002	0,0049
		OG	0,0053	0,0064	0,0061	0,0057	0,0054	0,0033	0,0042	0,0091
TP8	MW		0,0020	0,0015	0,0012	0,0012	0,0015	0,0025	0,0019	0,0052
	Konfidenzintervall	UG	0,0013	0,0011	0,0008	0,0006	0,0008	0,0018	0,0013	0,0042
		OG	0,0027	0,0019	0,0017	0,0018	0,0022	0,0031	0,0025	0,0061
TP9	MW		0,0047	0,0049	0,0047	0,0046	0,0046	0,0071	0,0059	0,0024
	Konfidenzintervall	UG	0,0019	0,0018	0,0016	0,0016	0,0016	0,0041	0,0030	0,0012
		OG	0,0075	0,0080	0,0078	0,0077	0,0076	0,0100	0,0088	0,0036
TP12	MW		0,0032	0,0012	0,0015	0,0020	0,0026	0,0041	0,0035	0,0049
	Konfidenzintervall	UG	0,0027	0,0002	0,0006	0,0013	0,0020	0,0029	0,0026	0,0038
		OG	0,0038	0,0022	0,0024	0,0028	0,0033	0,0052	0,0044	0,0060
TP13	MW		0,0017	0,0017	0,0012	0,0010	0,0013	0,0030	0,0021	0,0042
	Konfidenzintervall	UG	0,0016	0,0012	0,0007	0,0006	0,0011	0,0020	0,0014	0,0033
		OG	0,0018	0,0022	0,0018	0,0015	0,0015	0,0040	0,0028	0,0052

## Mittlerer Abstand $\Delta \overline{lm}_{2700K}^{RGB}$

Tabelle 75: Abstände  $\Delta \overline{lm}_{2700K}^{RGB}$  zwischen der 2700 K-Referenz und der RGB 2700 K-Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den modifizierten  $\bar{l}_{10}(\lambda), \bar{m}_{10}(\lambda), \bar{s}_{10}(\lambda)$  Spektralwertfunktionen bewertet. Farblich hinterlegt sind die Mittelwerte, die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

			$\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\bar{x}_{10}(\lambda+6nm)$
TP1	MW		0,23252221	0,23223406
	Konfidenzintervall	UG	0,23208047	0,23161784
		OG	0,23296394	0,23285028
TP4	MW		0,24069974	0,24177935
	Konfidenzintervall	UG	0,24069974	0,24177935
		OG	0,24069974	0,24177935
TP6	MW		0,23754353	0,23841566
	Konfidenzintervall	UG	0,23718618	0,23800484
		OG	0,23790089	0,23882648
TP7	MW		0,23195297	0,23123627
	Konfidenzintervall	UG	0,22963323	0,22878554
		OG	0,2342727	0,233687
TP8	MW		0,23510407	0,23523992
	Konfidenzintervall	UG	0,2340292	0,23396979
		OG	0,23617895	0,23651006
TP9	MW		0,22760881	0,22628869
	Konfidenzintervall	UG	0,22450111	0,22288517
		OG	0,23071651	0,22969221
TP10	MW		0,2392604	0,23995212
	Konfidenzintervall	UG	0,23828937	0,23830726
		OG	0,24023144	0,24159698
TP12	MW		0,24409677	0,24594651
	Konfidenzintervall	UG	0,24349937	0,2454569
		OG	0,24469417	0,24643612
TP13	MW		0,23096451	0,23013542
	Konfidenzintervall	UG	0,23089114	0,22997321
		OG	0,23103787	0,23029763
TP14	MW		0,23461409	0,23454117
	Konfidenzintervall	UG	0,23461409	0,23454117
		OG	0,23461409	0,23454117
TP15	MW		0,23119781	0,23026486
	Konfidenzintervall	UG	0,22922386	0,22800492
		OG	0,23317177	0,2325248

## Mittlerer Abstand $\Delta \bar{m}_{2700K}^{RGBW}$

Tabelle 76: Abstände  $\Delta \bar{m}_{2700K}^{RGBW}$  zwischen der 2700 K Referenz und der RGBW 2700 K Einstellung. Die Farbabstände der einzelnen Testpersonen sind mit den modifizierten  $\bar{l}_{10}(\lambda), \bar{m}_{10}(\lambda), \bar{s}_{10}(\lambda)$  Spektralwertfunktionen bewertet. Farbig hinterlegt sind die Mittelwerte die unter Verwendung einer bestimmten Spektralwertfunktion für die jeweiligen Testpersonen den geringsten Farbabstand berechnet haben. Zu den jeweiligen Abständen sind die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen.

			$\bar{y}_{10}(\lambda-3nm)$
TP1	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,25
TP4	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,24
TP6	MW		0,25
	Konfidenzintervall	UG	0,25
		OG	0,25
TP7	MW		0,25
	Konfidenzintervall	UG	0,25
		OG	0,25
TP8	MW		0,25
	Konfidenzintervall	UG	0,25
		OG	0,25
TP9	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,24
TP10	MW		0,25
	Konfidenzintervall	UG	0,25
		OG	0,25
TP12	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,25
TP13	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,25
TP14	MW		0,25
	Konfidenzintervall	UG	0,25
		OG	0,25
TP15	MW		0,24
	Konfidenzintervall	UG	0,24
		OG	0,24

## Gruppierungen individuell zugewiesener $\bar{l}_{10}(\lambda), \bar{m}_{10}(\lambda), \bar{s}_{10}(\lambda)$ Spektralwertfunktionen

Tabelle 77: Gruppierung für den mittleren Abstand  $\Delta \bar{l}m_{5200K}^{RGB}$

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
$\bar{l}_{10}(\lambda) \bar{m}_{10}(\lambda) \bar{s}_{10}(\lambda)$						X				
$\bar{m}_{10}(\lambda-3nm)$		X					X		X	
$\bar{m}_{10}(\lambda-2nm)$	X						X			
$\bar{m}_{10}(\lambda-1nm)$				X	X	X		X		

Tabelle 78: Gruppierung für den mittleren Abstand  $\Delta \bar{l}m_{5200K}^{RGBW}$

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
$\bar{l}_{10}(\lambda) \bar{m}_{10}(\lambda) \bar{s}_{10}(\lambda)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda-6nm)$	X		X			X		X		
$\bar{l}_{10}(\lambda-5nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda-4nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda-3nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda-2nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda-1nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda+1nm)$	X	X	X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda+2nm)$	X		X			X				
$\bar{l}_{10}(\lambda+3nm)$	X		X			X				
$\bar{m}_{10}(\lambda-4nm)$		X					X		X	
$\bar{m}_{10}(\lambda-3nm)$		X		X			X		X	X
$\bar{m}_{10}(\lambda-2nm)$		X	X	X			X			X
$\bar{m}_{10}(\lambda-1nm)$	X	X	X	X		X	X			
$\bar{m}_{10}(\lambda+1nm)$			X			X		X		
$\bar{m}_{10}(\lambda+2nm)$			X			X				
$\bar{s}_{10}(\lambda-3nm)$			X			X				
$\bar{s}_{10}(\lambda-2nm)$	X	X	X		X	X				
$\bar{s}_{10}(\lambda-1nm)$	X	X	X	X	X	X				

Tabelle 79: Gruppierung für den mittleren Abstand  $\Delta \bar{l}m_{2700K}^{RGBW}$

	TP1	TP2	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP12	TP13
$\bar{l}_{10}(\lambda) \bar{m}_{10}(\lambda) \bar{s}_{10}(\lambda)$								X		X
$\bar{m}_{10}(\lambda+4nm)$		X		X				X		
$\bar{m}_{10}(\lambda+5nm)$		X		X				X		
$\bar{m}_{10}(\lambda+6nm)$		X		X				X		
$\bar{s}_{10}(\lambda-2nm)$		X		X				X		
$\bar{s}_{10}(\lambda-1nm)$		X		X				X		



---

## I. Veröffentlichungen

---

---

### Fachartikel

---

Böll, Marvin; Geßner, Friederike; in Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG) (ed.): *„Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen - lichtmesstechnische und visuelle Feldtests“*. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG) In: Licht 20|12, 11.09.2012 - 14.09.2012, Berlin. Tagungsband, 20.

Khanh, Tran Quoc; Böll, Marvin; Pepler, Wjatscheslaw: *„LED-Technologie - Stand der Technik, Lichtqualität und ihre Wirkung auf die Innenraumbeleuchtung“*. [Online-Edition: <http://www.DBZ-lichtundraum.de>] In: Licht und Raum (1|2012) pp. 44-47, (2012).

Böll, Marvin; Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc: *„Entwicklung eines energieeffizienten LED-Beleuchtungssystems – Strategien zur Lösung des Binning-Problems“*. Abschlussbericht Entwicklungsprojekt Az:29166-21/0, (DBU 2012).

Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc; Schiller, Christoph; Haferkemper, Nils; Böll, Marvin: *„Jüngste Labortestergebnisse der mesopischen Helligkeitswahrnehmung verschiedener Straßenlampenspektren und weißer LEDs“*. Licht [Artikel], 2010.

Schiller, Christoph; Böll, Marvin; Kuhn, Thomas; Khanh, Tran Quoc: *„Straßenbeleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich – Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse aus einer wissenschaftlich begleiteten Teststraße in Darmstadt“*. In: Licht [Artikel], 2009.

---

### Konferenzbeiträge

---

Böll, Marvin; Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc: *“EVALUATION OF VISUAL COLOUR DIFFERENCES: CONSEQUENCES FOR BINNING CLASSIFICATION OF WHITE HIGH POWER LEDS”*. In: Lux Europa, 17-19 September 2013, Krakow, Polen.

Böll, Marvin; Khanh, Tran Quoc: *„Abgleich vom kaltweißen Licht bei 5200 K bei Beleuchtung auf weißen Flächen -Interpersonelle Streuung, Grenzwerte für "just noticeable " und "just tolerable"-Einstellungen“*. DfwG Tagung 2013, Ilmenau.

Khanh, Tran Quoc ; Böll, Marvin ; Schiller, Christoph ; Haferkemper, Nils : *„Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich“*. In: Licht 2008, Ilmenau.

---

## J. Lebenslauf

---

Beruflicher Werdegang	07/2008 – 04/2014 <i>Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik</i> Position: Wissenschaftlicher Mitarbeiter
	02/2007 – 10/2007 <i>Vocational Education Development Center (Malang, Indonesia)</i> Position: Fachpraktikant im Bereich Signalübertragung
Wehrdienst	10/1998 – 09/1999 <i>Pionierbataillon Ingolstadt</i>
Ausbildung	10/1999 – 06/2008 <i>Technische University Darmstadt.</i> Studium: Elektrotechnik und Informationstechnik Spezialisierung: Mikro- und Feinwerktechnik Abschluss: Dipl. Ing. (Gesamtnote: 2,58)  Thema Diplomarbeit: „ <i>Untersuchung des Betriebsverhaltens von Solarmodulen verschiedener Hersteller</i> “. (Gesamtnote: 1,3)  10/1984 – 06/1998 <i>Spessart-Gymnasium Alzenau</i> Abitur Gesamtnote: 2,6